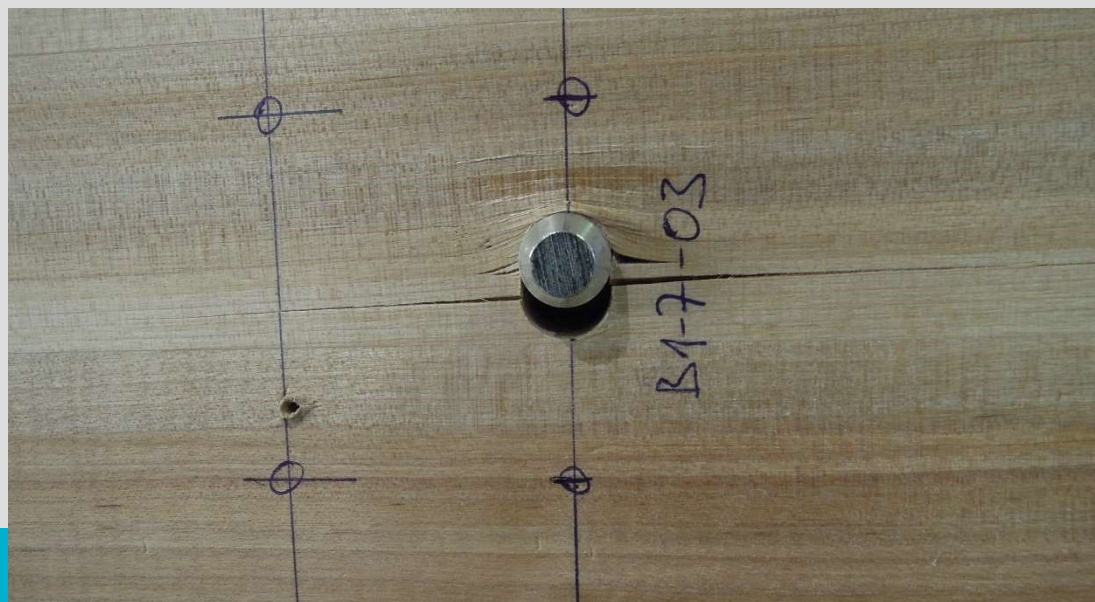


Untersuchungen zum Anrissverhalten von Stahlblech- Holz-Stabdübel-Verbindungen in Birken-Brettschichtholz bei Beanspruchung senkrecht zur Faser



M-4-09/2020

Dominik Mlinar, BSc
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz



Dominik Mlinar, BSc

**Untersuchungen zum Anrissverhalten
von Stahlblech-Holz-Stabdübel-
Verbindungen in Birken-
Brettschichtholz bei Beanspruchung
senkrecht zur Faser**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Schickhofer

Institut für Holzbau und Holztechnologie

Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Ringhofer

Graz, Juni 2020

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

Ich möchte mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Schickhofer bedanken, ohne ihn wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Mein Dank gilt auch Emer.-Prof. Dipl.-Ing.-ETH Ernst Gehri, aus dessen vorangegangenen Forschungsarbeiten konnte ich einige hilfreiche Informationen für die Umsetzung dieser Arbeit beziehen, zusätzliche Unterstützung erhielt ich aus seinem Feedback während der Prüfplanung.

Für die vielen Ratschläge möchte ich mich herzlichst bei Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Ringhofer bedanken, danke für deine kompetente Betreuung.

Besonderer Dank gilt Birgit Eckerstorfer für die gute Zusammenarbeit und den Gedanken- und Informationsaustausch unserer parallel verlaufenden Masterarbeiten.

Für die gute Zusammenarbeit möchte ich mich außerdem bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Holzbau und Holztechnologie sowie der holz.bau.forschungs gmbh und des Labors für konstruktiven Ingenieurbau bedanken. Besonders möchte ich die Mithilfe von Bernd Heissenberger, Werner Hansmann, Hannes Koitz und Alfred Klamminger bei der Erstellung der Prüfkörper und der Versuchsdurchführung erwähnen. Danke auch an Raimund Sieder für die Mithilfe bei der Auswertung sowie bei der Unterstützung in EDV-technischen Belangen.

Mein größter Dank gilt Sabrina und meiner Familie, die mich während meiner gesamten Studienzeit unterstützt haben und mich immer ermutigt haben, meinen Weg zu gehen.

Kurzfassung

In Zukunft werden aufgrund der veränderten klimatischen Verhältnisse und des vielversprechenden mechanischen Leistungspotentials vermehrt auch Laubhölzer wie Birke, Buche oder Esche im konstruktiven Ingenieurholzbau zum Einsatz kommen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Verhalten von Stahlblech-Holz-Stabdübelverbindungen bei einer Belastung quer zur Faser in Birkenholz untersucht. Das Verhalten von Holz quer zur Faser ist allgemein noch nicht sehr gut erfasst, im Speziellen gilt dies für derzeit noch nicht sehr intensiv eingesetzte Holzarten wie in diesem Fall der Birke. Die aktuelle Normung [1] für Stabdübelverbindungen basiert auf den im Jahr 1949 von Johansen [2] aufgestellten Tragmodellen. Ein Versagen durch plötzliches Aufreißen quer zur Faser wird durch die Einhaltung der Querkzugtragfähigkeit verhindert, diese ist abhängig von der Lage des Stabdübels.

Ein neuer ingenieurmäßiger Ansatz von Gehri [3] für die erläuterte Detailsituation in Buchenholz zielt auf die Ermittlung einer Anrisslast in Abhängigkeit des Stabdübel-Durchmessers ab, um ein Aufreißen quer zur Faser zu beschreiben. Diese Anrisslast ist nach Gehri [3] nur von den lokalen Holzeigenschaften abhängig, der Abstand zum belasteten Rand spielt keine Rolle.

Um diesen Ansatz nach Gehri [3] zu untersuchen, wurden in dieser Arbeit insgesamt 125 Prüfungen von Stabdübelverbindungen in Birken-Brettschichtholz-Trägern durchgeführt. Bei den Versuchen wurden der Stabdübel-Durchmesser, der Abstand zum belasteten Rand, die Seitenholz-Schlankheit sowie bei mehreren Stabdübeln hintereinander der Zwischenabstand variiert.

Für Verbindungen mit einem Stabdübel, der kein Fließgelenk ausbildet, konnte Gehri's [3] Annahme grundsätzlich bestätigt werden. Tritt bei Erhöhung der Schlankheit jedoch ein Fließgelenk im Stabdübel auf oder werden Verbindungen mit mehreren Stabdübeln betrachtet, so zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit noch weiteren Forschungsbedarf auf.

Abstract

Due to the ongoing climate change and the auspicious mechanical potential there will be an increased use of hardwoods like birch, beech or ash in structural timber in the near future. In this Master Thesis the behaviour of steel-to-timber-dowel-type connections in glued laminated timber made of birch, loaded perpendicular to the grain was investigated. The behaviour of timber loaded perpendicular to the grain has generally not been sufficiently investigated at all. This especially concerns woods species, such as birch, which are currently not frequently applied for structural purposes. The current standards [1] for dowel-type connections are based on Johansen's [2] yield theory from 1949. Failures by a sudden splitting perpendicular to the grain are prevented by compliance to the load carrying capacity perpendicular to the grain, which significantly depends on the position of the dowel.

A recent engineer-like approach by Gehri [3], derived for beech wood for this above-mentioned situation, considers a certain Crack-load, which depends on the dowel diameter. Thereby, Gehri [3] assumes that only local wood properties are responsible for the size of the crack load, while the distance to loaded edge of the timber beam doesn't matter.

To investigate Gehri's [3] approach for GLT made of birch, a total amount of 125 tests of dowel-type connections was carried out in the frame of this thesis. The parameter variation comprised the dowel-diameter, the distance to loaded edge, the ratio between the dowel-diameter and the side member thickness as well as for tests with more dowels in a row the minimum distance between the dowels themselves.

For joints with just one dowel, where the small side member thickness prevented the formation of a plastic hinge, Gehri's [3] approach generally could be confirmed. For a slenderness ratio leading to a plastic hinge in the dowel or for joints with more than one dowel in a row are there is still a need for further research.

Inhaltsverzeichnis

KAPITEL 1: EINLEITUNG	1
1-1 MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT	1
1-2 AUFBAU DER ARBEIT	1
KAPITEL 2: STAND DES WISSENS	2
2-1 LAUBHOLZ.....	2
2-1.1 Warum Laubholz?	2
2-1.2 Der Wald in Österreich.....	2
2-1.3 Laubholz in der DACH-Region.....	4
2-1.4 Birkenvorkommen Weltweit	4
2-1.5 Pilotprojekte mit Birkenholz	4
2-1.6 Der Aufbau von Holz	7
2-1.7 Merkmale der Birke.....	9
2-1.8 Mechanische Kenngrößen von Birkenholz.....	10
2-2 VERBINDUNGEN IM HOLZBAU	12
2-2.1 Ingenieurmässige Verbindungen	13
2-2.2 Zu führende Nachweise einer ingenieurmässigen Verbindung	13
2-2.3 Auf Abscheren beanspruchte Stabdübel.....	14
2-2.4 Kraftflussbeispiel einer Stiff förmigen Verbindung	15
2-2.5 Theorie nach Johansen	16
2-2.6 Duktilität.....	17
2-2.7 Einflussfaktoren auf Stabdübelverbindungen.....	18
2-2.7.1 Schlankheit	18
2-2.7.2 Gruppenwirkung.....	19
2-2.7.3 Fließmoment des Stabdübels	19
2-2.7.4 Lochleibungsfestigkeit	19
2-2.8 Lochleibungsfestigkeit von Birkenholz.....	20
2-2.8.1 Lochleibungsfestigkeit von Laubholz nach dem Eurocode 5.....	20
2-2.8.2 Lochleibungsfestigkeit von Laubholz nach Hübner et al.	21
2-2.8.3 Lochleibungsfestigkeit von Laubholz nach Hübner	21
2-2.8.4 Vergleich der Werte der Lochleibungsfestigkeit.....	22
2-2.8.5 Lochleibungsfestigkeit von Birkenholz nach Hohenwarter	22
2-2.8.6 Erkenntnisse für die Lochleibungsfestigkeit von Birkenholz.....	22
2-2.9 Mindestabstände	23
2-2.10 Querbeanspruchte Stabdübelverbindungen	24
2-3 BEMESSUNGSANSATZ NACH GEHRI	27
2-4 VERGLEICH DES EUROCODE 5 MIT DEM ANSATZ VON GEHRI.....	29
2-5 FORSCHUNGSFRAGE.....	29

KAPITEL 3: MATERIAL UND METHODEN.....	30
3-1 ÜBERBLICK.....	30
3-1.1 Vorversuche.....	30
3-1.2 Hauptversuche.....	30
3-2 MATERIAL.....	33
3-2.1 Birken-Brettschichtholz.....	33
3-2.1.1 Prüfkörperdimensionierung.....	33
3-2.1.2 Prüfkörperherstellung.....	39
3-2.2 Stabdübel.....	42
3-2.3 Stahlbleche und Verschleißteile.....	43
3-2.3.1 Stahlbleche.....	43
3-2.3.2 Verschleißteile.....	45
3-3 METHODEN.....	46
3-3.1 Vorversuche - Bestimmung des Fliessmoments.....	46
3-3.2 Hauptserie - Prüfung der Stabdübelverbindungen.....	48
3-3.2.1 Vorstellung und Diskussion der Prüfkfiguration.....	48
3-3.2.2 Dimensionierung der Widerlager.....	50
3-3.2.3 Verwendete Messtechnik.....	52
3-3.2.4 Abschätzung des Versagensmodus.....	53
3-3.2.5 Prüfdurchführung.....	54
3-3.2.6 Nachbereitung.....	58
KAPITEL 4: ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	64
4-1 ERGEBNISSE DER FLIESSMOMENT-AUSWERTUNG.....	64
4-2 ERGEBNISSE DER HAUPTVERSUCHE.....	65
4-2.1 Holzfeuchte und Rohdichte.....	65
4-2.1.1 Holzfeuchte.....	65
4-2.1.2 Rohdichte.....	66
4-2.2 Variation des Durchmessers.....	68
4-2.2.1 Anrisslast.....	68
4-2.2.2 Maximale Kraft.....	69
4-2.2.3 Verschiebungsmodul.....	70
4-2.3 Variation der Lage und der Seitenholzschlankheit.....	71
4-2.3.1 Anrisslast.....	71
4-2.3.2 Maximale Kraft.....	72
4-2.3.3 Verschiebungsmodul.....	74
4-2.4 Variation des Zwischenabstands.....	75
4-2.4.1 Anrisslast.....	75
4-2.4.2 Maximale Kraft.....	76
4-2.4.3 Verschiebungsmodul.....	77

4-2.5	Vergleich des Verschiebungsmoduls.....	79
4-2.6	Ergebnisse in Form der Lochleibungsfestigkeit	80
KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG		82
5-1.1	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	82
5-1.2	Empfehlungen für zukünftige Forschungen	83
ANHANG A LITERATURVERZEICHNIS		I
ANHANG B DIVERSE ANDERE ANHÄNGE		IV
B-1	PRÜFUNGSERGEBNISSE	IV
B-2	PRÜFAUFBAU DETAILPLÄNE	IX
B-3	STAHLTEILE DETAILPLÄNE.....	XI
B-4	KRAFT-ZEIT-DIAGRAMME JE SERIE.....	XV

KAPITEL 1: EINLEITUNG

1-1 MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT

Die Verwendung von Laubhölzern in der Baubranche wird aufgrund von veränderten klimatischen Bedingungen sowie einer erhöhten Nachfrage an Holzbauten weltweit mehr und mehr an Bedeutung gewinnen. Neben der bereits gut erforschten Buche sollten weitere Holzarten wie etwa die Birke noch genauer hinsichtlich ihrer Eignung für den Ingenieurholzbau untersucht werden.

Dies da das in Skandinavien, Russland sowie Nordamerika vorhandene Birkenvorkommen ein nicht zu unterschätzendes Potential für eine wirtschaftliche Nutzung aufweist. Der Vorteil von Laubholz sind die höheren mechanischen Kennwerte im Vergleich zu Nadelholz, wodurch sich neue spannende Einsatzmöglichkeiten für Holztragwerke ergeben können. Konstruktionen aus Laubholz können im Vergleich zu Konstruktionen aus Nadelholz bei identen Randbedingungen mit einem geringeren Querschnitt ausgeführt werden, woraus auch ein geringerer Holzverbrauch resultiert. Um diese hohen mechanischen Eigenschaften nutzbringend einzusetzen, muss auch die Verbindung der einzelnen Bauteile daran angepasst werden. Diese Bauteil-Anschlüsse werden heutzutage häufig als Stahlblech-Holz-Stabdübelverbindungen realisiert. Eine Versagensform bei diesem Verbindungstyp ist das Aufspalten des Holzes bei einer Beanspruchung quer zum Faserverlauf, was sich in seiner Beschreibung als vergleichsweise komplex erweist und noch weiteren Forschungsbedarf beinhaltet.

In den aktuellen Bemessungsrichtlinien und Regelwerken nach EC5 [1] wird durch die Einhaltung der Querkzugtragfähigkeit ein Aufreißen quer zur Faser verhindert. Diese ist von der Position des Stabdübels abhängig. Einen alternativen, ingenieurmäßigen Ansatz zum vorliegenden Problem hat Gehri [3] für in Buchenholz situierte, quer zur Faserrichtung beanspruchte, Stabdübel formuliert, mit welchem die Anrisslast in Abhängigkeit des Verbindungsmittel-Durchmessers bestimmt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit soll versucht werden, einen solchen Ansatz für Stabdübel in Birkenholz zu formulieren.

Das Ziel dieser Arbeit ist es daher, mögliche Einflussparameter auf diese Versagensform zu untersuchen, durch experimentelle Versuche weitere Erkenntnisse bezüglich des Aufspalt-Verhaltens von Holzkonstruktionen quer zur Faser zu bekommen, sowie wenn möglich ein einfaches Berechnungsmodell zur Bestimmung der Anrisslast in Abhängigkeit des Stabdübel-Durchmessers zu definieren. In der Praxis werden heutzutage vor allem mehrschnittige Stahl-Holz-Verbindungen mit mehreren Stahlblechen ausgeführt. Nachdem sich eine Untersuchung des Aufspaltens bei diesen Verbindungen als äußerst schwierig erweist, wurde der Fokus in dieser Arbeit auf eine Verbindung mit einem innenliegenden Stahlblech gelegt.

1-2 AUFBAU DER ARBEIT

Die vorliegende Arbeit ist im Wesentlichen in zwei Teile aufgegliedert. Im ersten Teil wird einleitend auf das Vorkommen von Laubhölzern, im Speziellen von Birkenholz, in Österreich sowie dem nordeuropäischen und russischen Raum eingegangen, zudem wird die Eigenschaften von Birkenholz untersucht. Weiters werden die Funktion und Wirkungsweise von Stabdübelverbindungen einleitend betrachtet, das Vorgehen bei der Bemessung für eine Beanspruchung quer zur Faser [1] erläutert und der zuvor erwähnte Ansatz von Gehri [3] vorgestellt.

Im zweiten Teil der Arbeit wird der Prüfplan vorgestellt, die verwendeten Materialien beschrieben und der Versuchsaufbau und die Durchführung der Prüfungen erläutert. Weiters werden der Auswertungsvorgang der Versuche beschrieben sowie die gewonnenen Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

KAPITEL 2: STAND DES WISSENS

2-1 LAUBHOLZ

2-1.1 WARUM LAUBHOLZ?

Im mitteleuropäischen Raum hat Laubholz im Ingenieurholzbau gegenwärtig nur einen relativ geringen Stellenwert. Hierfür wird überwiegend Nadelholz, bevorzugt Fichte eingesetzt. Laubhölzer werden größtenteils thermisch verwertet oder als Zier- und Möbelholz verwendet. Dabei bieten Laubhölzer teils deutlich höhere Festigkeitskennwerte und könnten, bei einer sinnvollen Integration in die tragende Struktur, ihre positiven Eigenschaften zur Wirkung bringen. Bei Tragwerken mit begrenztem Platzangebot könnten Laubholzkonstruktionen durch ihren geringeren Querschnittsbedarf bei identer statischer Tragfähigkeit eingesetzt werden. Die etwas höheren Kosten für das Laubholz könnten durch eine Material-Einsparung in der Konstruktion wieder ausgeglichen werden. Ein weiterer Einsatzbereich wären verleimte Hybrid-Träger, wobei die Laubhölzer in den stärker beanspruchten Randzonen des Querschnitts verbaut werden. In Bereichen mit geringerer Beanspruchung wird das preislich günstigere Nadelholz verwendet. Bei der Holzauswahl muss auch auf die gegenwärtig und zukünftig vorhandenen Waldressourcen Rücksicht genommen werden. Im letzten Jahrhundert wurden bei heimischen Nutzwäldern aufgrund des schnelleren Wuchses fast ausschließlich Nadelhölzer verwendet. Neben dem Augenmerk auf eine möglichst regionale Wertschöpfung der Ressourcen wird es in Zukunft notwendig sein, eine mögliche durch den Klimawandel verursachte Erwärmung der europäischen Regionen mit den damit einhergehenden vegetativen Veränderungen zu berücksichtigen. Dieser Umstand könnte zur zukünftigen Nutzung neuer Holzarten in der Baubranche führen. In einigen europäischen Ländern wie etwa der Schweiz ist schon eine Vorratssteigerung von Laubholz und ein Rückgang des Nadelholzbestandes zu bemerken. [4] Doch um dieses Potenzial zu heben, bedarf es noch eines Umdenkens und einer Weiterentwicklung der vorherrschenden Industriesparten. Aus diesen Erkenntnissen werden einige Laubholzarten wie etwa Buche, Esche, Eiche und Birke bereits in diversen Forschungsarbeiten [3] [5], [6], [7], [8], [9], [10] näher untersucht. Für eine weitverbreitete Anwendung von Laubhölzern sind allerdings noch viele spezifische Untersuchungen sowie weitere Grundlagenforschung notwendig.

2-1.2 DER WALD IN ÖSTERREICH

Wenn man die Zwischenauswertung der Österreichischen Wald Inventur (ÖWI) 2016/18 [11], Stand Mai 2019, genauer betrachtet, ergeben sich folgende Daten für den österreichischen Wald: Österreich besitzt eine Waldfläche von ca. 4 Millionen Hektar, wovon 3,34 Millionen Hektar Ertragswald sind. Auf dieser Fläche gibt es einen Gesamtvorrat von 1.173 Millionen Vorratsfestmeter Holz. Ein Hektar (ha) entspricht einer Fläche von 10.000 m² oder bildlich vorgestellt einer Fläche eines Quadrates mit 100 m Seitenlänge, ein Vorratsfestmeter (Vfm) gibt dabei die Menge eines Kubikmeters reiner Holzmasse inklusive der Rinde an und wird durch Multiplikation des Stamm-Querschnittes mit der Stamm-Länge berechnet. In der österreichischen Holz- und Forstwirtschaft ist die Fichte mit Abstand die meistverwendete Holzart, so stehen 708 Millionen Vfm Fichtenholz in Österreichs Wäldern. Der Anteil an Laubhölzern ist, verglichen mit anderen Ländern, relativ gering. Aus der ÖWI [11] ist diese Fokussierung auf Fichtenholz in Abbildung 2-1 deutlich erkennbar. In Österreichs Wäldern stehen rund 80 % Nadelhölzer und 20 % Laubhölzer, mit einem Gesamtanteil von 60 % Fichten. Die häufigste Laubbaumart ist mit einem Gesamtanteil von 10 % und fast 118 Millionen Vfm die Rotbuche. Birken sind mit einem Gesamtanteil von nur 0,5 % vom Ertragswald für die Wirtschaft vernachlässigbar gering, ungefähr 5,6 Millionen Vfm Birkenholz stehen in Österreichs Wäldern, wobei in Österreich viele Birken nur einen relativ geringen Stammdurchmesser aufweisen.

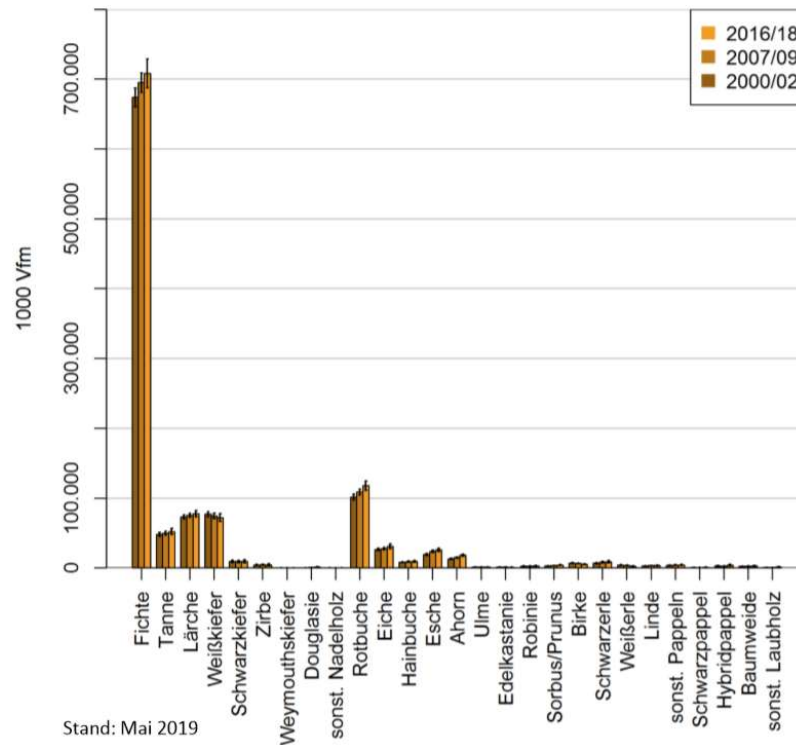


Abbildung 2-1: Vorrat an Holz in Österreich nach Baumarten; aus [11]

Bei der Nutzung des österreichischen Baumbestandes sind nach der ÖWI [11] in Abbildung 2-2 ähnliche Verhältnisse anzutreffen. Die Fichte ist mit einem weiten Abstand an erster Stelle, weitere vermehrt genutzte Baumarten sind Weißkiefer, Rotbuche, Tanne und Lärche. In Zahlen ausgedrückt stehen 17 Millionen Vfm Fichtenholz einer Nutzung von 1,75 Millionen Vfm Rotbuche und 224.000 Vfm Birkenholz gegenüber.

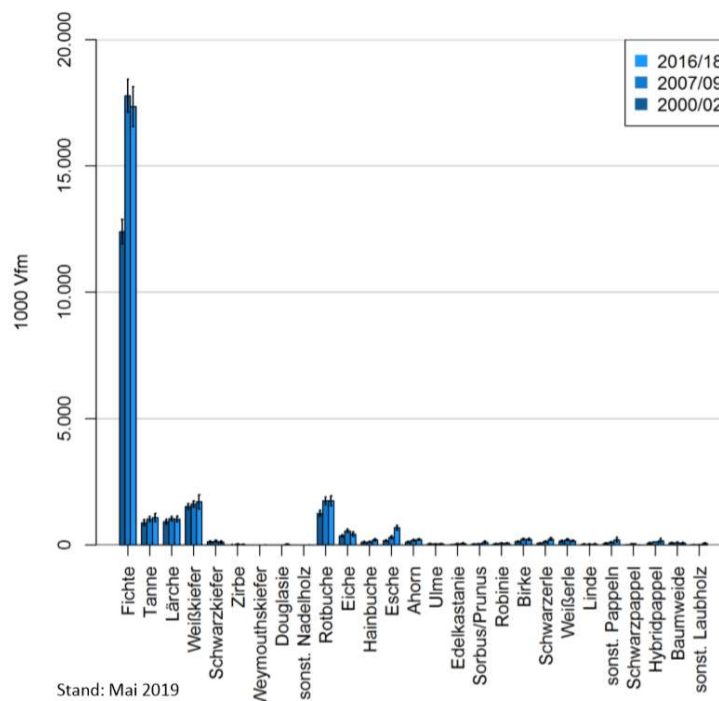


Abbildung 2-2: Nutzung von Holz in Österreich nach Baumarten; aus [11]

2-1.3 LAUBHOLZ IN DER DACH-REGION

Aus dem vorangegangenen Kapitel 2-1.2 geht hervor, dass in Österreich die Buche die häufigste Laubbaumart ist, gleiches gilt auch für Deutschland. Daher gibt es auch Produkte für den konstruktiven Ingenieurholzbau auf dem heimischen Markt, wie etwa die BauBuche der Firma Pollmeier [12]. Dabei handelt es sich um ein Furnierschichtholz aus regionalem Buchenholz, aus dem schon einige Projekte realisiert wurden. Aus einem Bericht von Jeitler und Augustin [10] geht hervor, dass sich in der DACH-Region (Deutschland, Österreich und Schweiz) ein Holzvorrat von 819 Millionen Vfm Buchenholz befindet, dem gegenüber stehen in der NORDIC-Region (Norwegen, Schweden und Finnland) 817 Millionen Vfm Birkenholz. Aufgrund dieser Tatsache ist eine Entwicklung von Produkten aus Birkenholz aus marktökonomischer Sicht plausibel.

2-1.4 BIRKENVORKOMMEN WELTWEIT

Weltweit betrachtet gibt es Regionen mit Birkenvorkommen, die durchaus ein wirtschaftliches Potential beherbergen. In Tabelle 2-1 sind die Birkenanteile, in Prozent des gesamten Waldes ausgedrückt, für Skandinavische Länder sowie Russland angegeben.

Tabelle 2-1: *Vergleich des Birkenanteil in % des gesamten Waldes in skandinavischen Länder sowie Russland; aus [13], [14], [15], [16], [17], [18]*

Land	Birkenanteil in % des gesamten Waldes
Russland [13]	15
Schweden [14]	18
Finnland [15]	16
Lettland [16]	24
Estland [17]	31
Litauen [18]	22

Wie aus Tabelle 2-1 hervorgeht, hat die Birke in Skandinavien und Russland durchaus einen höheren Stellenwert. Sie wird jedoch bevorzugt zu Furnier geschält und zu Platten verleimt. Russland als das flächenmäßig größte Land der Erde beherbergt schon auf Grund des Flächenausmaßes an Wäldern ein großes Potential. Russland hat 882 Millionen ha Waldfläche, wovon 15 % Birken sind. [13] Im Vergleich dazu hat ganz Österreich nur eine Fläche von 8,39 Millionen ha. [19] Es stellt sich daher nicht die Frage, ob Potential vorhanden ist, sondern wie dieses bestmöglich genutzt werden kann. Verarbeitungstechnisch können sowohl mit der in Skandinavien gängigen Methode des Schälens, sowie der in Österreich konventionellen Methode mit Brettware konstruktive Bauteile hergestellt werden. Brettbasierende, lastabtragende Holzprodukte aus Birkenholz werden derzeit nur von einem österreichischen Unternehmen in geringem Umfang hergestellt. Das Unternehmen Hasslacher Norica Timber [20] produziert Birken-Brettschichtholz und Birken-Brettsperrholz für den konstruktiven Einsatz. Das Birkenholz wird jedoch aus Malaya Vishera (Russland) bezogen, wo das Unternehmen ein Sägewerk betreibt. In dieser Region ist die Birke die Hauptholzart mit einem Anteil von etwa 30 %. Das Material wird derzeit jedoch größtenteils nicht genutzt und verrottet im Wald. Um diese Ressourcen in Zukunft besser zu verwerten, werden daher Produkte aus Birkenholz angeboten.

2-1.5 PILOTPROJEKTE MIT BIRKENHOLZ

Zur Demonstration der Eignung als tragendes Bauteil für den Ingenieurholzbau werden nachfolgend ausgesuchte Pilotprojekte vorgestellt, bei welchen Brettbasierende Holzwerkstoffe aus Birkenholz bereits zum Einsatz kamen. [20]

Massive Living Graz

Bei Massive Living Graz [21] handelt es sich um einen mehrgeschossigen Wohnbau in der Wittenbauerstraße in Graz, der 2012 fertig gestellt wurde (siehe Abbildung 2-3). In zwei Gebäuden, die durch eine unterirdische Tiefgarage miteinander gekoppelt sind, werden der Grazer Bevölkerung insgesamt 22 Wohneinheiten mit Nutzflächen von 60 bis 90 m² zur Verfügung gestellt. Die tragende Konstruktion des Gebäudes wurde, mit Ausnahme des Stahlbeton-Stiegenhauses, aus herkömmlichen Fichten-Brettsperrholz-Elementen hergestellt. In einer Wohneinheit wurden jedoch auch Wandelemente aus Birken-Brettsperrholz verbaut und mit Sensoren zur Langzeitmessung von Feuchte und Temperatur versehen. Da es für dieses Produkt noch keine Zulassung gab, wurden alle für den Einbau und statischen Nachweis benötigten Kennwerte mittels am Institut für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz durchgeführter Versuche bestimmt.

Günther [8] hat im Zuge seiner Masterarbeit die Auswertung der verbauten Sensoren des Langzeit-Monitorings durchgeführt. Ziel dieses Monitorings war u. a. ein Vergleich des bauphysikalischen Verhaltens von Birken- und Fichtenholz, wofür Temperatur und Feuchtegehalt des Holzes kontinuierlich über eine Dauer von zwei Jahren gemessen wurden.



Abbildung 2-3: Bilder vom Projekt „Massive Living“ Graz; aus [21]

Einfamilienhaus Raser

Beim Einfamilienhaus Raser [20], [22] handelt es sich um das erste Einfamilienhaus in Holz-Massivbauweise, welches mit Birken-Brettsperrholz errichtet wurde. Die Oberflächen des in der Oststeiermark situierten Objektes sind, wie in Abbildung 2-4 ersichtlich ist, in Sichtqualität ausgeführt worden. Durch den Einsatz der Birken-Elemente mit den höheren mechanischen Festigkeiten konnten zirka 10 % ÷ 15 % Material gegenüber einer herkömmlichen Fichtenholz-Konstruktion eingespart werden.



Abbildung 2-4: Bild vom Birken-Brettschichtholz in Sichtqualität beim Einfamilienhaus Raser; aus [20]

NORITEC Industriehalle

Bei der NORITEC Industriehalle [20] handelt es sich um eine aus Birken-Brettschichtholz konstruierte Lagerhalle, die in Abbildung 2-5 dargestellt wird. Für die Halle wurden, wie in Abbildung 2-6 ersichtlich ist, ein Fachwerk-Querträger mit einer Spannweite von 27 m sowie Hauptträger mit einer Spannweite von 18 m und einem Kragarm von fast 6 m verwendet.



Abbildung 2-5: Montage der Industriehalle aus Birken-Brettschichtholz; aus [23]



Abbildung 2-6: Darstellung des Birken-Fachwerks der NORITEC-Halle; aus [23]

2-1.6 DER AUFBAU VON HOLZ

Um die in dieser Arbeit untersuchten Parameter besser zu verstehen, muss auch auf den Aufbau von Holz näher eingegangen werden. Holz ist ein natürlich vorkommender Rohstoff, der aufgrund seiner anisotropen Struktur in jede Richtung unterschiedliche Festigkeitswerte aufweist. Um diese Anisotropie besser zu verstehen, wird in Abbildung 2-7 zunächst der makroskopische Aufbau von Holz betrachtet. Dies beinhaltet alles, was mit freiem Auge noch gesehen werden kann, wie etwa die Jahresringe, die Porenverteilung und den Faserverlauf. [24]

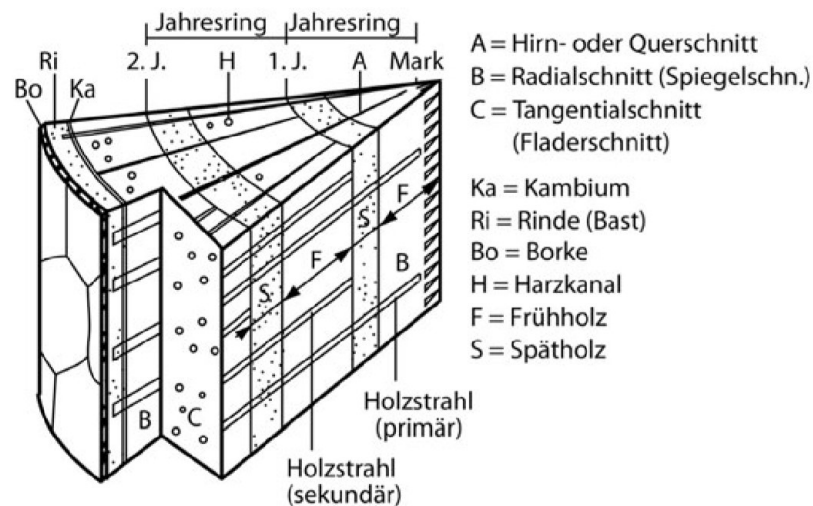


Abbildung 2-7: Skizze des Aufbaus eines Holzstammes; aus [24]

Beim Ausgangsprodukt eines Holzstammes muss prinzipiell in drei verschiedene Richtungen unterschieden werden, diese sind radial, tangential und longitudinal. Die longitudinale Richtung verläuft entlang der Holzfasern, die radiale weist im rechten Winkel zu den Jahresringen nach außen und die tangentiale Richtung verläuft entlang der Jahresringe. Diese drei Richtungen werden orthogonal zueinander angenommen. Dies trifft jedoch nur theoretisch zu, da der Stamm eigentlich einen Kegelstumpf gleicht und es aufgrund von Wuchsstörungen zu Abweichungen kommen kann. [25]

Im Querschnitt sind die Jahresringe, Kern- Splint- Früh- und Spätholz sowie das Mark erkennbar, siehe Abbildung 2-8. Das Mark ist zuständig für die Wasserleitung und Speicherung des jungen Sprosses. [24] Das Alter eines Baumes kann durch das Zählen der Jahresringe bestimmt werden. Diese entstehen, da in unserer Klimazone aufgrund der jahreszeitlichen Temperatur- und Witterungsveränderungen vier Wachstumsphasen vorhanden sind:

- Ruhephase von November bis Februar
- Mobilisierungsphase im März und April
- Wachstumsphase von Mai bis Juli
- Depositionsphase von August bis Oktober

Das in der Wachstumsphase entstehende Frühholz ist hell, großlumig und dünnwandig, dagegen sind Holzzellen, die in der Depositionsphase entstehen dunkler, englumig und dickwandig und werden als Spätholz bezeichnet. Das Frühholz ist für den Wassertransport innerhalb des Baumes zuständig, das Spätholz dient zur Festigung. [26] Durch dieses natürliche Wachstum des Holzes ergibt sich eine jahreszeitlich periodische inhomogene Faserwanddicke, die zu einer variierenden lokalen Dichte der Jahresringe führt. [25]

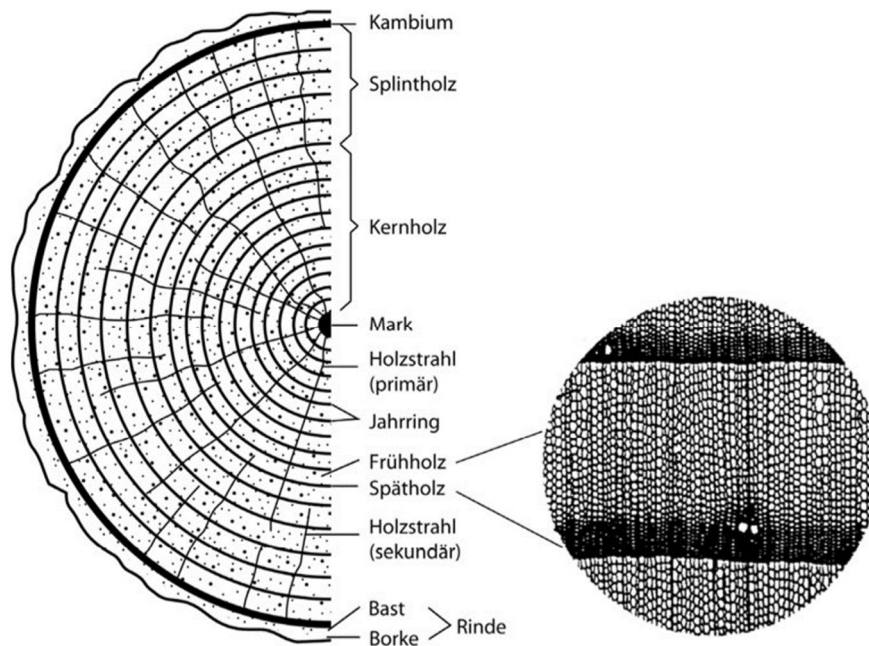


Abbildung 2-8: Skizze des Querschnitts durch einen Holzstamm; aus [24]

Ferner wird zwischen Kernholz und Splintholz unterschieden. Kernholz enthält keine lebenden Zellen, während das noch jüngere Splintholz lebende Zellen enthält, die zur Wasserleitung und Speicherung von Zucker dienen. Die Birke zählt zu den Splintholzbäumen, diese haben keinen Farb- beziehungsweise Feuchteunterschied zwischen Kern- und Splintholz. Bei Laubholz muss je nach Anordnung der Poren zwischen ringporigen und zerstreutporigen Hölzern unterschieden werden, siehe Abbildung 2-9. Ringporige Hölzer weisen im Frühholz große ringförmig angeordnete Gefäße auf, zerstreutporige Hölzer haben über den Jahresverlauf gleichmäßig verteilte Gefäße. Zu den ringporigen Hölzern zählen Eiche, Esche und Ulme, zerstreutporige Hölzer sind unter anderem Birke, Buche und Pappel. Bei den zerstreutporigen Hölzern können die Jahrringe häufig nicht so deutlich zu erkennen sein. [24]

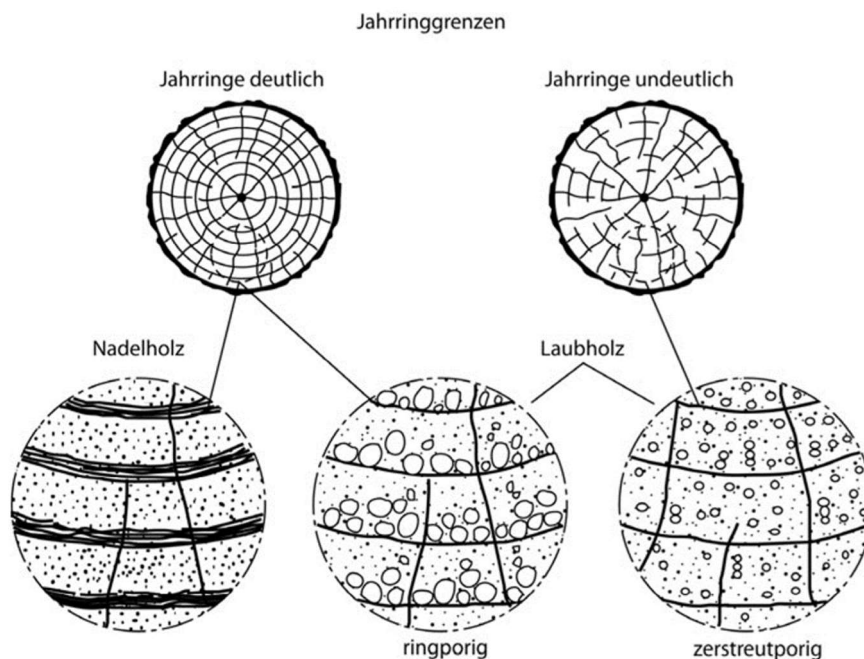


Abbildung 2-9: Skizze der Jahrringe inklusive der Darstellung von ringporigen und zerstreutporigen Hölzern; aus [24]

Diese Holzstrukturen sind die Ursache für die verschiedenen Festigkeitswerte in longitudinaler, radialer und tangentialer Richtung, wobei die Festigkeitswerte längs und senkrecht zur Faser einen Unterschied um den Faktor von 10 bis 20 aufweisen. [25] Repräsentativ können diese unterschiedlichen Festigkeitswerte auch gut anhand der jeweiligen Elastizitätsmodul-Werte (E-Modul) aufgezeigt werden: [24]

$$E_{\text{längs}} : E_{\text{radial}} : E_{\text{tangential}} = 100 : 10 : 6 \quad (1.1)$$

Senkrecht zur Faser weist Holz die geringsten Festigkeits- und Steifigkeitswerte auf. Aufgrund dieser geringen Querkzugfestigkeit besteht bei einer Belastung quer zur Faser häufig die Gefahr eines spröden Querkzugversagens. Da spröde Materialien meist große Streuungen in ihren Kennwerten aufweisen, besitzt der Materialkennwert der Querkzugfestigkeit höhere Streuungen als andere Festigkeitswerte des Holzes. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Querkzugfestigkeit vom beanspruchten Volumen des Holzes abhängt, was in der Nachweisführung mit einem Volumeneffekt berücksichtigt wird. [25]

2-1.7 MERKMALE DER BIRKE

In dieser Arbeit wird im Speziellen Birkenholz untersucht, daher wird diese Baumgattung beziehungsweise diese Holzart nachfolgend näher betrachtet. In Abbildung 2-10 wird der ganze Baum und die Holzmaserung dargestellt.



Abbildung 2-10: Darstellung eines ganzen Birken-Baumes; aus [27] sowie der Struktur von Birkenholz; aus [28]

Die Birke, botanischer Name *Betula*, ist eine Gattung der Familie der Birkengewächse und zählt zu den sommergrünen Bäumen, das heißt sie verliert im Herbst ihre Blätter. Zur Familie der Birkengewächse (Betulaceae) zählen unter anderem auch die Weiß- und Hainbuche. [24] In Österreich kommen von den weltweit mehr als 60 Birkenarten vier vor - die Hängebirke oder auch Sandbirke genannt (*Betula Pendula*), die Moorbirke (*Betula pubescens*), die Strauchbirke (*Betula humilis*) sowie die Zwergbirke (*Betula nana*). Moor- und Hängebirken werden bis zu 30 Meter hoch, während Strauch- und Zwergbirken mit einer Wuchshöhe von nur ca. 3 Meter als Sträucher gesehen werden. [29] Die Birke wächst als Licht-Baumart sehr schnell, wird jedoch nur ca. 120 Jahre alt. [28] Bis auf die Hängebirke befinden sich alle Birkenarten in Österreich auf der roten Liste der gefährdeten Pflanzenarten, Grund dafür ist ein massiver Rückgang von Waldrändern und Mooren, die von den Birken besiedelt werden. [29] Die Birke ist ein Pionierbaum und besiedelt somit als erster Baum Lichtungen und nicht bewaldete Flächen. In Österreich kommt sie überall bis in Seehöhen von 1500 Meter ü. A. vor. Äußerlich ist die Birke durch ihre weiße Rinde, die oft von schwarzen Rissen unterteilt ist, einfach zu erkennen, wie in Abbildung 2-11 links ersichtlich ist. [28]

Der Verwendungszweck von Birken ist sehr vielfältig und reicht schon Jahrtausende zurück. Früher wurden aus dem Birkenbast Kleidung und Schuhe gefertigt, aus der Rinde fertigten einige amerikanische

Indianerstämme Kanus. Noch heute wird die Birke vielfältigen Verwendungszwecken zugeführt, so werden beispielsweise aus dem Holz Musikinstrumente gefertigt, aus den Blättern wird Tee gekocht. [29]

Im industriellen Einsatzbereich wird Birkenholz vor allem in Form von Birkensperrholzplatten für den Modell- und Möbelbau verwendet. Für Edelfurniere wird nach Holz mit einem welligen Faserverlauf gesucht, siehe Abbildung 2-11 rechts, dies wird auch als Maserbirke vermarktet. [28]

Die Birke zählt zu den zerstreutporigen Hölzern, d.h. an glatten Querschnitten sind die Poren als feine, helle Punkte zu erkennen. Die Jahrringgrenzen sind durch schlanke dunkle Spätholzstreifen optisch sichtbar. Das Holz ist blassgelblich bis rötlichweiß, häufig ist eine braunrötliche Verfärbung des Kernbereiches vorzufinden. [28] Mit einer Brinell-Härte von 23 N/mm^2 ist Birkenholz mittelhart und zählt mit einer Darrdichte von 640 kg/m^3 zu den schweren Holzarten. Für Insekten- und Pilzbefall ist Birkenholz anfällig und liegt in der Dauerhaftigkeitsklasse 5. [28]

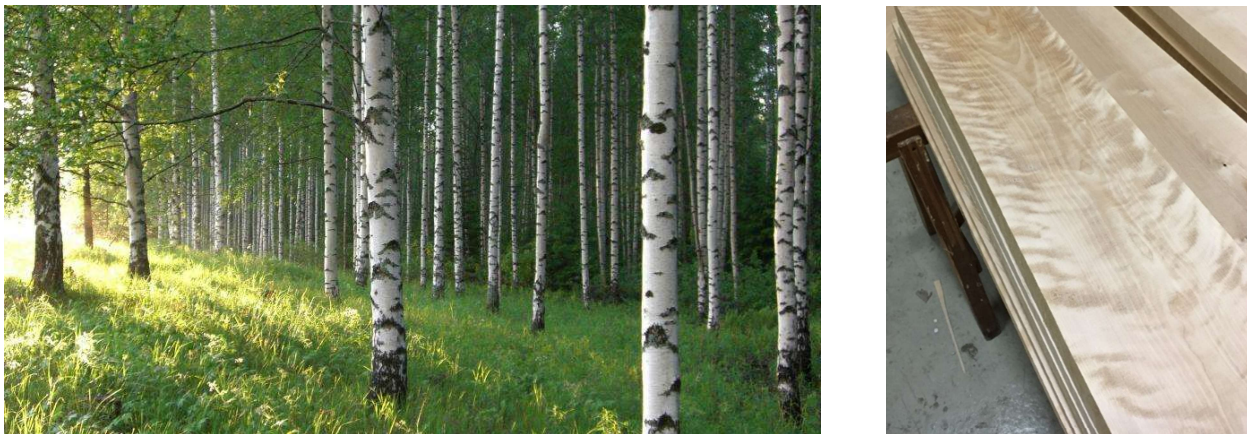


Abbildung 2-11: Bild eines Birkenwaldes; aus [30], Bild der welligen Struktur der Maserbirke

2-1.8 MECHANISCHE KENNGRÖßEN VON BIRKENHOLZ

Um mögliche Vorteile von Birken- gegenüber Fichtenholz zu erkennen, werden diese beiden Hölzer in Tabelle 2-2 einem direkten Vergleich unterzogen. Um einen aussagekräftigen Vergleich vornehmen zu können, werden beide Holzarten aus einer Quelle entnommen, die Daten stammen aus dem Buch „Holzspektrum“ von Proholz Austria [31]. Zu berücksichtigen ist dabei, dass sich die Kenngrößen in Tabelle 2-2 auf merkmalfreie Kleinproben beziehen. Man erkennt deutlich, dass mit der höheren Rohdichte des Birkenholzes auch höhere Festigkeitswerte einhergehen. Als Nachteil könnte angesehen werden, dass das Schwind- und Quellverhalten von Birkenholz etwas ausgeprägter ist, als das von Fichte.

In der Literatur gibt es bisher nur wenige Untersuchungen zu den mechanischen Kenngrößen von aus Birkenholz hergestellten brettbasierenden Holzwerkstoffen. In Tabelle 2-3 werden einige Werte für Brettschichtholz (BSH) dargestellt, die aus Untersuchungen der Firma Hasslacher Norica Timber [20] stammen. Diese werden mit Kenngrößen für Fichten-BSH der Festigkeitsklasse GL32h nach EN 14080 [32] verglichen. Dabei fällt auf, dass Birken-BSH quer zur Faser deutlich höhere Werte für die Druckfestigkeit sowie den E-Modul aufweist. Die Rohdichte ist auch höher, die restlichen Kenngrößen befinden sich ungefähr auf gleichem Niveau. Da das Birkenholz für die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Versuche ebenfalls von dieser Firma bezogen wurde, werden diese Kenngrößen als repräsentativ angesehen.

Tabelle 2-2: Kenngrößen aus merkmalfreien Kleinproben von Birke und Fichte; aus [31]

Kenngröße	Birke	Fichte	Einheit
Rohdichte Mittelwert ρ_{12}	673	441	[kg/m ³]
Rohdichte Grenzwert ρ_{12}	510-830	330-680	[kg/m ³]
Gesamtschwindmaß-axial	0,6	0,3	[%]
Gesamtschwindmaß-radial	5,3	3,6	[%]
Gesamtschwindmaß-tangential	8,2	7,8	[%]
Differentielle Quellung-radial	0,27	0,19	[%/%]
Differentielle Quellung-tangential	0,36	0,33	[%/%]
Biege-Elastizitätsmodul	16.500	12.500	[N/mm ²]
Biegefestigkeit f_m	147	95	[N/mm ²]
Zugfestigkeit $f_{t,0}$	137	77	[N/mm ²]
Druckfestigkeit $f_{c,0}$	51	44	[N/mm ²]
Brinellhärte $H_{B,0}$	49	32	[N/mm ²]
Brinellhärte $H_{B,90}$	23	12	[N/mm ²]

Tabelle 2-3: mechanische Kenngrößen von Birken-Brettschichtholz; aus [20] und [32]

Kenngröße	Bezeichnung	BSH-Birke [20]	BSH-Fichte GL32h [32]	Einheit
Biegefestigkeit	$f_{m,k}$	32	32	[N/mm ²]
Zugfestigkeit in Faser	$f_{t,0,k}$	26	25,6	[N/mm ²]
Druckfestigkeit in Faser	$f_{c,o,k}$	32	32	[N/mm ²]
Zugfestigkeit quer zur Faser	$f_{t,90,k}$	0,6	0,5	[N/mm ²]
Druckfestigkeit quer zur Faser	$f_{c,90,k}$	4,5	2,5	[N/mm ²]
Elastizitäts-Modul in Faser	$E_{0,mean}$	15.000	14.200	[N/mm ²]
Elastizitäts-Modul quer zur Faser	$E_{90,mean}$	650	300	[N/mm ²]
Dichte	ρ_k	600	440	[kg/m ³]

2-2 VERBINDUNGEN IM HOLZBAU

Aufgrund der natürlichen Formgebung des Rohstoffes Holz als stabförmiges Ausgangsmaterial mit begrenzten Längen und Querschnittsabmessungen, kommt der Verbindung einzelner Bauteile im Holzbau schon seit jeher eine große Bedeutung zu. Die Tragfähigkeit und somit auch die Wirtschaftlichkeit eines Tragwerkes hängt in großem Maße von der richtigen Wahl und optimalen Ausführung der Verbindung ab. Die drei wichtigen Parameter zur Klassifizierung von Verbindungen sind die Tragfähigkeit, die Steifigkeit und die Duktilität, wobei jeweils das Maximum angestrebt wird. [33]

Grundsätzlich können Verbindungen nach verschiedenen Merkmalen unterteilt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierfür die Einteilung anhand des Skriptum-Holzbau der TU Graz [33] herangezogen, siehe Abbildung 2-12.

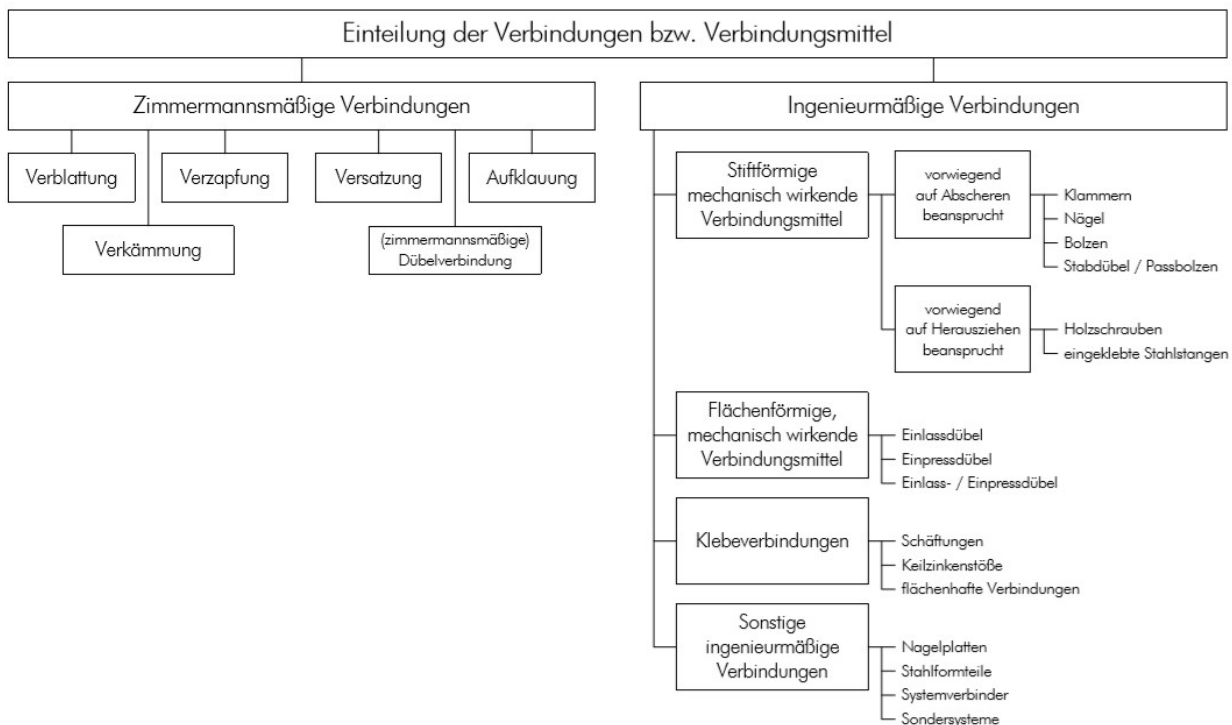


Abbildung 2-12: Einteilung der Verbindungsmittel; aus [33]

Hierbei sind die zwei Hauptkategorien zimmermannmäßige und ingenieurmäßige Verbindungen. Die zimmermannmäßigen Verbindungen sind mitunter jahrhundertealte, aus dem Handwerk entstandene reine Holz-Holz-Verbindungen, die meistens ohne Berechnung nur anhand von Erfahrungen dimensioniert wurden. Aufgrund der Schwächung des Holzquerschnittes haben zimmermannmäßige Verbindungen einen geringen Nutzungsgrad und eine geringe Steifigkeit, weisen jedoch eine relativ hohe Duktilität auf. Ingenieurmäßige Verbindungen sind vergleichsweise neuere Verbindungsarten, die i. d. R. mit Klebstoffen oder mit Stahlteilen ausgeführt und rechnerisch nachgewiesen werden können. Abbildung 2-13 zeigt eine zimmermannmäßige Verbindung des Dachstuhls im Liebfrauenmünster in Ingolstadt, sowie eine ingenieurmäßige Verbindung der Wenner-Brücke in St. Georgen ob Murau. [33] In weiterer Folge wird auf die ingenieurmäßigen Verbindungen näher eingegangen.



Abbildung 2-13: Bild einer zimmermannsmäßigen Verbindung; aus [34] sowie einer ingenieurmäßigen Verbindung; aus [33]

2-2.1 INGENIEURMÄSSIGE VERBINDUNGEN

Bei ingenieurmäßigen Verbindungen werden die Kräfte hauptsächlich über metallische Verbindungsmittel oder über Klebeflächen in die zu fügenden Bauteile übertragen. Ingenieurmäßige Verbindungen werden im Skriptum der TU Graz [33], wie in Abbildung 2-12 dargestellt ist, unterteilt in stiftförmige Verbindungsmittel, flächenförmige Verbindungsmittel, Klebeverbindungen sowie sonstige Verbindungen. Bei den stiftförmigen Verbindungsmittel wird nochmals zwischen zwei Arten unterschieden, den vorwiegend auf Herausziehen beanspruchten Verbindungsmittel sowie den vorwiegend auf Abscheren beanspruchten Verbindungsmittel wie zum Beispiel Nägel oder Stabdübel.

Unter den ingenieurmäßigen Verbindungen haben die stiftförmigen Verbindungsmittel aus wirtschaftlicher Perspektive den größten Anteil. Bei kleinen Spannweiten wie in etwa bei Dachstühlen von Einfamilienhäusern oder bei der Verbindung von Brettsperrholz-Elementen im Wohnungsbau werden Schraubverbindungen eingesetzt. Bei Tragwerken mit größeren Spannweiten wie zum Beispiel Brücken oder Hallenüberdachungen kommen, neben großen Schrägschraubanschlüssen, hauptsächlich Stabdübelverbindungen zum Einsatz. Charakteristisch für stiftförmige Verbindungen ist, dass sie in der Regel aus mehreren schlanken Verbindungsmittel zusammengesetzt werden, wobei bei diesen die Länge im Verhältnis zum Durchmesser sehr groß ist. [33]

In dieser Arbeit werden Stabdübelverbindungen untersucht, daher wird auf die genaue mechanische Wirkungsweise nur bei Verbindungsmittel mit der Hauptbeanspruchung Abscheren näher eingegangen.

2-2.2 ZU FÜHRENDE NACHWEISE EINER INGENIEURMÄSSIGEN VERBINDUNG

Ingenieurmäßige Verbindungen werden rechnerisch nachgewiesen, im Grenzzustand der Tragfähigkeit sind nach dem Skriptum Holzbau der TU Graz [33] prinzipiell folgende Nachweise zu führen:

- Verbindungsmittel
 - Nachweis des Verbindungsmittels
 - Nachweis des umgebenden Holzes
- Holzteil
 - Nachweis im Nettoquerschnitt
 - Nachweis gegen Abscheren (Blockscheren)
- Stahlteil
 - Nachweis im Nettoquerschnitt

2-2.3 AUF ABSCHEREN BEANSPRUCHTE STABDÜBEL

Die im Rahmen des experimentellen Teils dieser Arbeit eingesetzten Stabdübel, siehe Abbildung 2-14, sind glatte zylindrische Stäbe (i. d. R. aus Stahl) mit Durchmessern von 6 mm bis 30 mm. Stabdübel werden üblicherweise in vorgebohrte Löcher der zu verbindenden Bauteile eingebracht. In Abbildung 2-15 werden einige Anwendungsbeispiele für Stabdübelverbindungen bei verschiedenen Knotenausbildungen dargestellt. Im Unterschied zu Passbolzen besitzen Stabdübel keinen Kopf bzw. keine Mutter. Die Lagesicherung wird durch die Klemmwirkung des Bohrloches sichergestellt, bzw. werden fallweise vereinzelt Passbolzen mitverbaut, siehe Abbildung 2-13. Die Bohrungen im Holz werden dabei mit dem Durchmesser der Stabdübel ausgeführt, die Bohrungen in den Stahlblechen dürfen um bis zu einem Millimeter größer ausgeführt werden. Wenn außenliegende Stahlbleche eingesetzt werden, müssen anstelle von Stabdübel Passbolzen verwendet werden. [33]



Abbildung 2-14: Bild eines im experimentellen Teil dieser Arbeit verwendeten Stabdübels

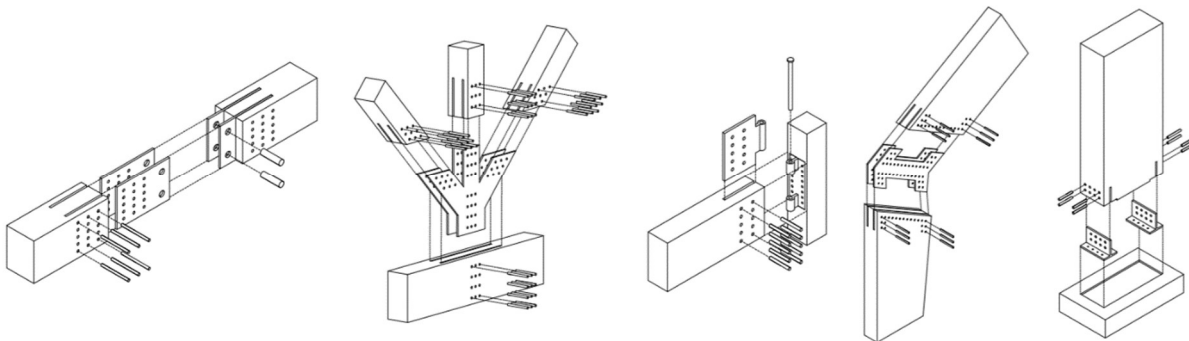


Abbildung 2-15: Skizze von typischen Anwendungsbeispielen für Stabdübelverbindungen; aus [33]

Stabdübel werden primär auf Abscheren beansprucht, wobei die Kräfte über den Kontakt des Verbindungsmittels mit dem Holz auf Druck übertragen werden, woraus die Lochleibungspressung des Holzes resultiert. Je nach Passgenauigkeit der Verbindung (Größe des Lochspiels) kann bei einer Belastung zuerst ein von der Beanspruchung unabhängiger Weg, auch Schlupf genannt, eintreten, bis das Verbindungsmittel an der Bohrlochwand aufliegt. Bei genügend großer Holzfläche beziehungsweise biegeweichem Stabdübel wird, bevor das Holz versagt der Stabdübel ein Fließmoment bilden, siehe Abbildung 2-16. [33]



Abbildung 2-16: Bild eines verformten Stabdübels in Birkenholz aus den Versuchen von Eckerstorfer; aus [7]

2-2.4 KRAFTFLUSSBEISPIEL EINER STIFFFÖRMIGEN VERBINDUNG

Um das Wirken der verschiedenen Kräfte und die daraus resultierenden Verformungen zu veranschaulichen, ist in Abbildung 2-17 eine einschnittige Holz-Holz-Verbindung mit Stabdübel dargestellt. Diese stellt eine der einfachsten Formen dieser Verbindung dar, bei mehreren Scherfugen wird die Berechnung und Betrachtung oft auf einfachere Formen heruntergebrochen.

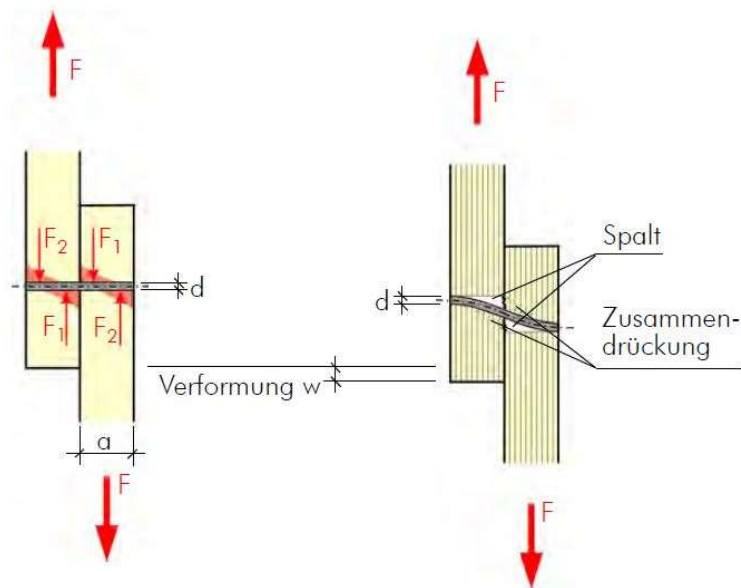


Abbildung 2-17: Skizze der Kraftübertragung und Verformung einer einschnittigen Holz-Holz-Verbindung mit einem Stabdübel; aus [33]

Als Scherfuge wird die Kontaktfläche der zu verbindenden Elemente bezeichnet, bei der hier dargestellten einschnittigen Verbindung ist nur eine Scherfuge vorhanden. Im Bereich der Scherfuge wird die Kraft F über den Kontakt der Lochleibung des Holzes auf den Stabdübel übertragen. Durch die Exzentrizität bilden die Kräfte F_1 ein Kräftepaar, welches vom äußeren betragsmäßig kleineren Kräftepaar F_2 ausgeglichen wird, um ein Momentengleichgewicht zu gewährleisten. Diese beiden Kräftepaare verursachen im Stabdübel eine Biegebeanspruchung, die zur dargestellten Verformung führt, welche ferner eine Stauchung des Holzes bewirkt. [33]

“Die Tragfähigkeit einer stiftförmigen Verbindung wird somit von der Lochleibungsfestigkeit der miteinander verbundenen Hölzer und dem Fließmoment des Stiftes bestimmt.” [33]

Ferner muss zwischen Holz-Holz-Verbindungen, bei denen mehrere Holzelemente mittels Stabdübel miteinander verbunden werden, und den heute üblichen Stahl-Holz-Verbindungen, bei denen die Holzelemente mithilfe von eingeschlizten Stahlblechen gefügt werden, unterschieden werden. Stahl-Holz-Verbindungen haben den Vorteil, dass mehrere Scherfugen bei einem verhältnismäßig geringen Platzbedarf untergebracht werden können, da die Stahlbleche im Vergleich zu den eingesetzten Holzelementen sehr schlank ausfallen. Somit sind Verbindungen mit 3 oder 4 Blechen bei normalen Holzquerschnitten möglich.

“Stabdübel-Verbindungen, insbesondere Stahl-Holz-Verbindungen, stellen die leistungsfähigste rein mechanische Verbindungsmöglichkeit dar” [3]

Im Zuge dieser Arbeit wird nur auf die Stahl-Holz-Verbindungen näher eingegangen, alle nachfolgenden Kapitel behandeln somit diese Art von Verbindung.

2-2.5 THEORIE NACH JOHANSEN

Der Wegbereiter für die Berechnung der Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen ist Johansen [2], der 1949 mit seinen theoretischen Ansätzen, auch als Johansen-Theorie bekannt, die Grundlagen für die Berechnung erarbeitet hat.

Das auf Johansen [2] basierende Tragmodell unterscheidet dabei prinzipiell drei verschiedene Versagensformen, jeweils auf eine Scherfuge betrachtet. Sobald die Lochleibungsfestigkeit in einem der verbundenen Holzteile erreicht ist oder der Stabdübel ein Fließgelenk bildet, ist die Tragfähigkeit der Verbindung erreicht. Als Versagensmodus 1 wird das Holzversagen auf Lochleibungsdruck bezeichnet. Beim Versagensmodus 2 entsteht ein Fließgelenk im Stabdübel und bei Versagensmodus 3 entstehen zwei Fließgelenke im Stabdübel je Scherfuge. Dabei wird immer der Versagensmodus mit der geringsten Tragfähigkeit maßgebend. In Abbildung 2-18 sind die drei Versagensmodi für die in dieser Untersuchung verwendete Bauteilkonfiguration mit einem innenliegenden Stahlblech dargestellt.

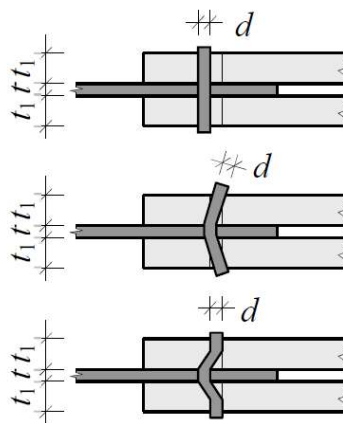


Abbildung 2-18: Skizze der 3 Versagensmodi von Stabdübelverbindungen; aus [35]

Die nachfolgenden Punkte beeinflussen, welcher Versagensmodus maßgebend wird:

- Typ der Verbindung (Holz-Holz oder Stahl-Holz),
- Geometrie der Verbindung (ein- oder mehrschnittig),
- Dicke der Holzteile,
- Fließmoment des Stabdübels, und
- Lochleibungsfestigkeit der verbundenen Holzteile.

Bei diesen Tragmodellen nach Johansen [2] wird von einem ideal starr-plastischen Verhalten der Materialien sowohl vom Holz als auch von den Stabdübeln ausgegangen. Das heißt, dass spröde Versagensformen wie das Aufspalten des Holzes zufolge Querkzugbeanspruchung nicht berücksichtigt werden. In der Praxis sind diese Versagensformen allerdings häufig maßgebend, da die Versagenslasten deutlich kleiner sind als die theoretische Tragfähigkeit nach Johansen. [36]

Die Ansätze von Johansen [2] werden in der ÖNORM B 1995-1-1:2019 [1] für die Bestimmung der Tragfähigkeit von auf Abscheren beanspruchten Verbindungsmitteln empfohlen, wobei zwischen einschnittige und zweischnittige Holz-Holz sowie Holz-Stahl-Verbindungen unterschieden wird. Mehrschnittige Verbindungen werden mit Kombinationen der angegebenen Modelle berechnet. Es müssen für jede Verbindung alle drei Versagensmechanismen überprüft werden, der Modus mit der geringsten Tragfähigkeit gilt als maßgebend. Beispielhaft wird hier der Berechnungsansatz für die Tragfähigkeit einer zweischnittigen Stahlblech-Holz-Verbindung mit einem innen liegenden eingeschlitzten Stahlblech, wie in Abbildung 2-18 zu sehen ist, angeführt.

$$R_d = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,d} \cdot t_1 \cdot d \\ f_{h,1,d} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,d}}{f_{h,1,d} \cdot t_1^2 \cdot d}} - 1 \right] + \Delta R_d \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,d} \cdot f_{h,1,d} \cdot d} + \Delta R_d \end{array} \right\} \quad (1.2)$$

R_d	Tragfähigkeit des Verbindungsmittels je Scherfuge [mm]
$f_{h,1,d}$	Wert der Lochleibungsfestigkeit des Seitenholzes [N/mm ²]
t_1	Dicke des Seitenholzes [mm]
d	Durchmesser des Verbindungsmittels [mm]
$M_{y,d}$	Fließmoment des Verbindungsmittels [Nmm]
ΔR_d	Anteil aus der Seilwirkung (für Stabdübel 0)

2-2.6 DUKTILITÄT

In Abbildung 2-19 wird anhand eines Last-Verschiebungsdiagramms die Duktilität näher betrachtet. Beim Last-Verschiebungsverhalten einer auf Abscheren beanspruchten Stabdübelverbindung gibt es idealisiert betrachtet einen elastischen und einen plastischen Bereich, wobei die maximale Tragfähigkeit erst beim Erreichen des plastischen Bereiches ausgenützt wird. Die Duktilität einer Verbindung als Verhältnis zwischen Bruch- und Fließverschiebung bestimmt maßgebend das Tragverhalten. Durch Passungenauigkeiten werden die einzelnen Stabdübel unterschiedlich stark belastet. Treten vor dem Versagen größere plastische Verformungen aufgrund einer hohen Duktilität auf, kann ein Ausgleich dieser ungleichmäßigen Belastung erreicht werden. Ein ähnliches Verhalten kann auf die gesamte Tragkonstruktion umgelegt werden, wo durch die Duktilität eine Umlagerung der Kräfte stattfinden kann. [36]

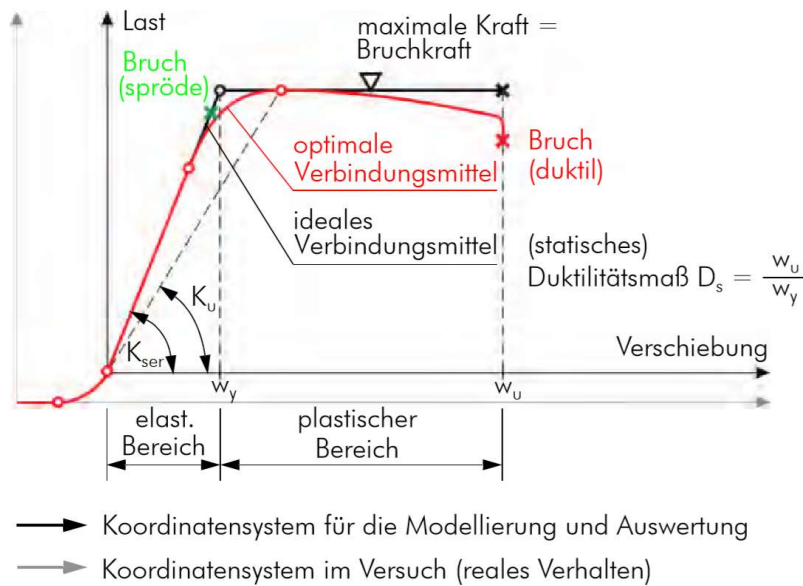


Abbildung 2-19: Definition der wesentlichen mechanischen Kenndaten einer Verbindung anhand des Last-Verschiebungsdiagramms; aus [33]

Um die Steifigkeit einer Verbindung zu quantifizieren, wird der Verschiebungsmodul K_{ser} / K_u verwendet. K_{ser} ist dabei die Kenngröße für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, K_u jene für den Grenzzustand der Tragfähigkeit. Das Verhältnis von $K_{ser} : K_u$ kann für Stabdübelverbindungen vereinfacht mit dem Faktor 2/3 angegeben werden. [33]

Holz wird durch ein in der Regel sprödes Bruchverhalten charakterisiert, das heißt das Versagen tritt ohne größere Verformung ein. Dieses Verhalten ist für Konstruktionen im Bauwesen nicht erwünscht. Verbindungen in Holzkonstruktionen sind daher die wenigen Zonen im Tragwerk, mit welchen durch ihre Ausgestaltung (Vorsehen von Stahlbauteilen mit plastischen Reserven) das gewünschte duktile Verhalten der Gesamtstruktur erzielt werden kann. [33] Für Stabdübelverbindungen bedeutet dies, dass die Schlankheit der Stabdübel so groß gewählt werden sollte, dass das Versagen zufolge des Erreichens von Versagensmodus 3 eintritt. [36]

2-2.7 EINFLUSSFAKTOREN AUF STABDÜBELVERBINDUNGEN

Aus den obigen Erläuterungen ist erkennbar, dass als materialbezogene Einflussfaktoren die Lochleibungsfestigkeit sowie das Fließmoment für eine Stabdübelverbindung ausschlaggebend sind. Weiters kommen als systemabhängige Einflussfaktoren noch die Gruppenwirkung und Reibung dazu. Beim Entwurf von Verbindungen gibt es also mehrere Parameter, mit denen die Tragfähigkeit beeinflusst werden kann. [9]

2-2.7.1 Schlankheit

Ein wichtiges Merkmal bei Stabdübelverbindungen ist die Schlankheit, welche als Verhältnis von Holzstärke zu Stabdübel-Durchmesser definiert ist und wie folgt berechnet wird:

$$\lambda = \frac{t}{d} \quad (1.3)$$

λ Schlankheit des Verbindungsmittels
 d Durchmesser des Verbindungsmittels [mm]
 t (Seiten-)Holzstärke [mm]

Für die Lochleibungsfestigkeit wird von einer gleichmäßigen Spannungsverteilung entlang des Stabdübels ausgegangen. Bei einer zu großen Schlankheit bildet der Stabdübel ein Fließgelenk aus und verformt sich, was zu Spannungsspitzen führt. Durch die Schlankheit kann auch auf den Versagensmodus der Verbindung geschlossen werden. Bei geringer Schlankheit tritt ein Lochleibungsversagen des Holzes ein, wird die Schlankheit erhöht, tritt Versagensmodus 2 und bei weiterer Steigerung Versagensmechanismus 3 ein.

2-2.7.2 Gruppenwirkung

Die Bestimmung der Tragfähigkeit nach Johansen [2] erfolgt prinzipiell für eine Scherfuge eines einzelnen Stabdübels. Um die Tragfähigkeit einer gesamten Verbindung zu ermitteln, müssen die Tragfähigkeiten der einzelnen Stabdübel mit der Anzahl der Scherfugen multipliziert und dann mit der Anzahl der Stabdübel in der Verbindung summiert werden. Dies geschieht in der Regel unter Berücksichtigung eines Abminderungsfaktors n_{ef} . Diese Abminderung ist u. a. nötig, da aufgrund von Herstellungsungenauigkeiten bzw. des vorhandenen Lochspiels nicht alle Stabdübel die gleiche Belastung erfahren.

$$R_{d,ges} = R_d \cdot s \cdot m \cdot n_{ef} \quad (1.4)$$

$R_{d,ges}$	Tragfähigkeit der gesamten Verbindung [N]
R_d	Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels [N]
s	Anzahl der Scherfugen
m	Anzahl der Reihen
n_{ef}	wirksame Anzahl von Verbindungsmittel in einer Reihe

2-2.7.3 Fließmoment des Stabdübels

Das Fließmoment des Stabdübels hängt vom Stabdübel-Durchmesser und von der Stahlfestigkeit ab. Gemäß dem Eurocode 5 der ÖNORM B 1995-1-1:2019 [1] wird das charakteristische Fließmoment mit nachfolgender Funktion bestimmt:

$$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (1.5)$$

$M_{y,k}$	charakteristischer Wert des Fließmomentes des Verbindungsmittels [Nmm]
$f_{u,k}$	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Verbindungsmittels [N/mm ²]
d	Durchmesser des Verbindungsmittels [mm]

2-2.7.4 Lochleibungsfestigkeit

Die Lochleibungsfestigkeit f_h ist der Widerstand, den das Holz der Einpressung eines auf Abscheren beanspruchten Stabdübels entgegenstellt. Sie ist ein Spannungswert und wird daher als Kraft pro Fläche angesehen und mit nachfolgender Formel vereinfacht ausgedrückt: [9]

$$f_h = \sigma_h = \frac{F}{d \cdot t} \quad (1.6)$$

f_h	idealisierte Lochleibungsfestigkeit [N/mm ²]
σ_h	Lochleibungsspannung [N/mm ²]
d	Durchmesser des Stabdübels [mm]
t	(Seiten-)Holzstärke [mm]

Die Lochwandung wird durch das Verbindungsmittel radial beansprucht, wobei diese Beanspruchung in eine Komponente in Richtung der einwirkenden Kraft und in eine Komponente im rechten Winkel dazu zerlegt werden kann, vgl. Abbildung 2-20.

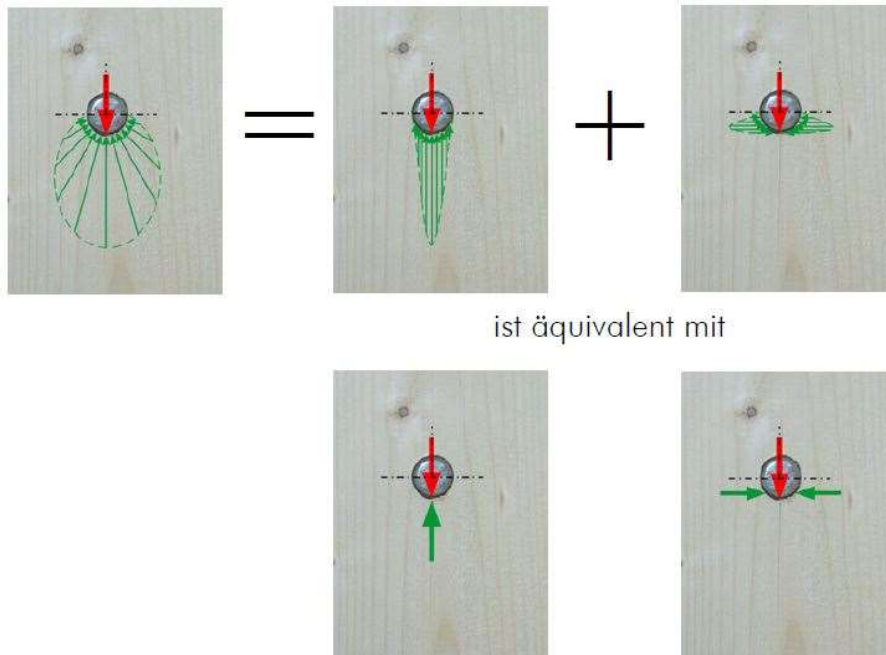


Abbildung 2-20: Skizze der Aufteilung der Kräfte bei einer Lochleibungsbeanspruchung; aus [33]

Die im rechten Winkel zur Faserrichtung angreifende Komponente der Lochleibungsbeanspruchung führt dabei zu Querkzugspannungen. Sind diese groß genug, führt dies zum Aufspalten des Holzes. Zu beachten ist, dass die Lochleibungsfestigkeit kein reiner Materialkennwert ist, sondern ein Systemwert von „Verbindungsmittel-Holz“ der von Parametern wie Durchmesser und Oberflächenbeschaffenheit des Verbindungsmittels, Eintreibverfahren des Verbindungsmittels, Rohdichte des Holzes sowie Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung des Holzes abhängig ist. Fehlerhafte Bohrlöcher vermindern die Lochleibungsfestigkeit einer Stabdübelverbindung. Bei zu großem Spiel zwischen Stabdübel und Bohrloch können Spannungsspitzen entstehen, bevor der gesamte Stabdübel satt im Bohrloch anliegt. Diese Spannungsspitzen können zu einem Anriss des Holzes quer zur Faser führen. Mit zunehmender Holzfeuchte nimmt die Lochleibungsfestigkeit ab, jedoch neigen die Verbindungen bei niedrigerer Holzfeuchte bereits bei geringeren Verformungen zum Aufspalten. [9]

2-2.8 LOCHLEIBUNGSFESTIGKEIT VON BIRKENHOLZ

Die bereits in Abschnitt 2-1.8 genannten Kenngrößen sollen einen gesamtheitlichen Überblick zu den Materialeigenschaften von Birken-Brettschichtholz vermitteln. Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Verbindungen ist jedoch der Wert der Lochleibungsfestigkeit von größter Bedeutung. Im Speziellen wird die Lochleibungsfestigkeit senkrecht zur Faser benötigt. Hierfür werden im folgenden Abschnitt mögliche Berechnungsansätze vorgestellt, wobei diese sich auf Laubholz allgemein beziehen. Anschließend wird ein Vergleich dieser Werte mit experimentell ermittelten Lochleibungsfestigkeiten von Birkenholz verglichen.

2-2.8.1 Lochleibungsfestigkeit von Laubholz nach dem Eurocode 5

In der ÖNORM B 1995-1-1:2019 [1] (nationaler Anhang zum Eurocode 5) wird die Lochleibungsfestigkeit parallel bzw. im Winkel zur Faser mit nachfolgenden Formeln angegeben:

$$f_{h,0,k} = 0,082 (1 - 0,01 d) \rho_k \quad (1.7)$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (1.8)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 d \quad (\text{Nadelholz}) \quad (1.9)$$

$$k_{90} = 0,90 + 0,015 d \quad (\text{Laubholz}) \quad (1.10)$$

$f_{h,0,k}$	charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit in Faserrichtung [N/mm ²]
$f_{h,\alpha,k}$	charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit im Winkel α zur Faser [N/mm ²]
d	Durchmesser des Stabdübels [mm]
ρ_k	charakteristischer Wert der Rohdichte [kg/m ³]
α	Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung
k_{90}	Faktor für die Abminderung der Festigkeit rechtwinkelig zur Faserrichtung

Im vorliegenden Nachweisformat zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit sind der Durchmesser des Stabdübels und die Rohdichte linear enthalten, d. h. je größer der Durchmesser (die Rohdichte), desto kleiner (größer) wird die Lochleibungsfestigkeit. Durch eine aufgeraute Oberfläche des Stabdübels lässt sich die Lochleibungsfestigkeit zusätzlich erhöhen, was allerdings im gegenwärtigen Bemessungskonzept nicht berücksichtigt wird.

Da Holz ein orthotropes Material ist, sind abhängig vom Winkel zwischen der Kraft- und Faserrichtung verschiedene Werte für die Lochleibungsfestigkeit anzusetzen. Mit zunehmendem Winkel nimmt dabei die Lochleibungsfestigkeit ab, bei querbeanspruchten Stabdübelverbindungen ist daher die Lochleibungsfestigkeit am geringsten. Um diesen Einfluss zu berücksichtigen, wird der Faktor k_{90} eingeführt, welcher das Verhältnis der Lochleibungsfestigkeit in Faserrichtung zur Lochleibungsfestigkeit im rechten Winkel zum Faserverlauf beschreibt. [33] Der Einfluss dieser Winkelabhängigkeit nimmt dabei mit kleiner werdendem Stabdübel-Durchmesser ab. Für Stabdübel mit einem Durchmesser von kleiner oder gleich 8 mm darf der Faktor k_{90} mit 1,0 angesetzt werden, da dann der Winkeleinfluss vernachlässigbar gering ist. [33]

2-2.8.2 Lochleibungsfestigkeit von Laubholz nach Hübner et al.

Abweichend vom Eurocode 5 [1] gibt es noch weitere auf experimentelle Untersuchungen basierende Ansätze für die Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit von Laubholz. Hübner et al. [6] haben im Jahr 2008 die folgende Formel für Laubholz im Winkel zur Faser entwickelt:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{0,015 \cdot \rho_k^{1,3} \cdot d^{-0,2}}{(0,62 + 0,035 \cdot d) \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (1.11)$$

$f_{h,\alpha,k}$	charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit im Winkel α zur Faser [N/mm ²]
d	Durchmesser des Stabdübels [mm]
ρ_k	charakteristischer Wert der Rohdichte [kg/m ³]
α	Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung

2-2.8.3 Lochleibungsfestigkeit von Laubholz nach Hübner

2013 hat Hübner [5] im Zuge seiner Dissertation Untersuchungen zur Lochleibungsfestigkeit mit den Hölzern Esche, Buche und Robinie angestellt. Daraus hat Hübner eine weitere Formel zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit im Winkel zur Faser für Laubhölzer aufgestellt:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{2,60 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_k^{1,57} \cdot d^{-0,2}}{(1 - k_{h,90}) \cdot \cos^3 \alpha + k_{h,90}} \quad (1.12)$$

$$k_{h,90} = 0,48 \cdot d^{0,33} \quad (1.13)$$

$f_{h,\alpha,k}$	charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit im Winkel α zur Faser [N/mm ²]
d	Durchmesser des Stabdübels [mm]
ρ_k	charakteristischer Wert der Rohdichte [kg/m ³]
α	Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung
$k_{h,90}$	Beiwert der Lochleibungsfestigkeit

2-2.8.4 Vergleich der Werte der Lochleibungsfestigkeit

Die verschiedenen Werte für die Lochleibungsfestigkeit sind in Tabelle 2-4 verglichen. In die Formeln wird ein Stabdübel-Durchmesser von 12 mm und eine Rohdichte von 600 kg/m³ für Laubholz bzw. 440 kg/m³ für Nadelholz (GL32h lt. EN 14080 [32]) eingesetzt. Der Winkel wird mit 90 Grad angesetzt, somit wird der charakteristische Wert quer zur Faser ermittelt. Bei diesen Kenngrößen gilt es zu beachten, dass sie für Laubholz im Allgemeinen gelten. Bei der Berechnungsmethode des Eurocode 5 [1] wird die Lochleibungsfestigkeit von Laubholz beinahe doppelt so hoch wie die für Nadelholz angegeben. Zu erkennen ist, dass der Wert für Laubholz aus dem Eurocode 5 [1] im Vergleich zu Hübners [5], [6] Werten deutlich höher liegt. Aus diesen Werten kann ein ansehnliches mechanisches Potential von Laubhölzern erkannt werden.

Tabelle 2-4: Vergleich der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit; aus [6], [5] und [1]

Quelle	Holzart	Kenngröße	Lochleibungsfestigkeit [N/mm ²]
Hübner et al. 2008 [6]	Laubholz	$f_{h,90,k}$	35,88
Hübner 2013 [5]	Laubholz	$f_{h,90,k}$	33,38
Eurocode 5 [1]	Laubholz	$f_{h,90,k}$	40,09
Eurocode 5 [1]	Nadelholz GL32h	$f_{h,90,k}$	20,75

2-2.8.5 Lochleibungsfestigkeit von Birkenholz nach Hohenwarter

Die in Abschnitt 2-2.8.4 diskutierten Berechnungsansätze gelten für Laubholz im Allgemeinen, für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Verbindungen sind allerdings Werte speziell für Birkenholz von großem Interesse. Hohenwarter [9] hat im Zuge ihrer Masterarbeit an der TU Graz Versuche zur Lochleibungsfestigkeit von Fichten- und Birkenholz durchgeführt, wobei sie die Belastungen Zug und Druck parallel zur Faser untersuchte, siehe Tabelle 2-5. Der Mittelwert der Lochleibungsfestigkeit für Birkenholz betrug dabei 34,44 N/mm². Die Versuche wurden mit einem Durchmesser von 12 mm parallel zur Faser geführt. Der Mittelwert der Rohdichten, auf 12 % Holzfeuchte bezogen, ergab für Birke 610 kg/m³ und für Fichte 441 kg/m³. Man kann aus den Untersuchungen von Hohenwarter [9] eine ungefähr 35 % höhere Lochleibungsfestigkeit von Birke im Vergleich zu Fichte erkennen, was das Potential von Birkenholz widerspiegelt.

Tabelle 2-5: Vergleich der Lochleibungsfestigkeit von Birke und Fichte aus den Versuchen von Hohenwarter [9]

Quelle	Holzart	Kenngröße	Lochleibungsfestigkeit [N/mm ²]
Hohenwarter 2014	Birke	$f_{h,0,mean}$	34,44
Hohenwarter 2014	Fichte	$f_{h,0,mean}$	25,47

2-2.8.6 Erkenntnisse für die Lochleibungsfestigkeit von Birkenholz

Die Werte von Hohenwarter [9] sind die aus ihren Versuchen ermittelten Mittelwerte parallel zur Faser, die Werte von Hübner [5], Hübner et al. [6] sowie des Eurocode 5 [1] sind charakteristische Werte quer zur Faser. Somit ist ein direkter Vergleich der Werte nicht möglich und sinnvoll. Da prinzipiell die Lochleibungsfestigkeit quer zur Faser etwas geringer ist als parallel zur Faser und die Mittelwerte höher sind als die charakteristischen Werte, wird vermutet, dass die gegenwärtigen Berechnungsansätze für Laubhölzer die Lochleibungsfestigkeit von Birkenholz überschätzen. Zur Abschätzung der

Lochleibungsfestigkeit der Versuche sind daher die Werte $f_{h,0,mean}$ von Hohenwarter [9] herangezogen worden.

2-2.9 MINDESTABSTÄNDE

Bei Stabdübelverbindungen werden in der Regel mehrere Stabdübel für eine Verbindung eingesetzt. Die Anordnung der Stabdübel erfolgt dabei möglichst kompakt. Das Einhalten der Mindestabstände der Stabdübel untereinander sowie von den Hirnholzenden und Rändern soll ein Aufspalten bei faserparalleler Beanspruchung verhindern. In Abbildung 2-21 werden die Bezeichnungen und Richtungen der Mindestabstände schematisch dargestellt. Tabelle 2-6 gibt die Mindestabstände für Stabdübelverbindungen in Abhängigkeit des Durchmessers nach dem Eurocode 5 [1] an.

Weiters muss bei einer Gruppe von Stabdübeln ein Blockscher-Versagen durch den zugehörigen Nachweis ausgeschlossen werden.

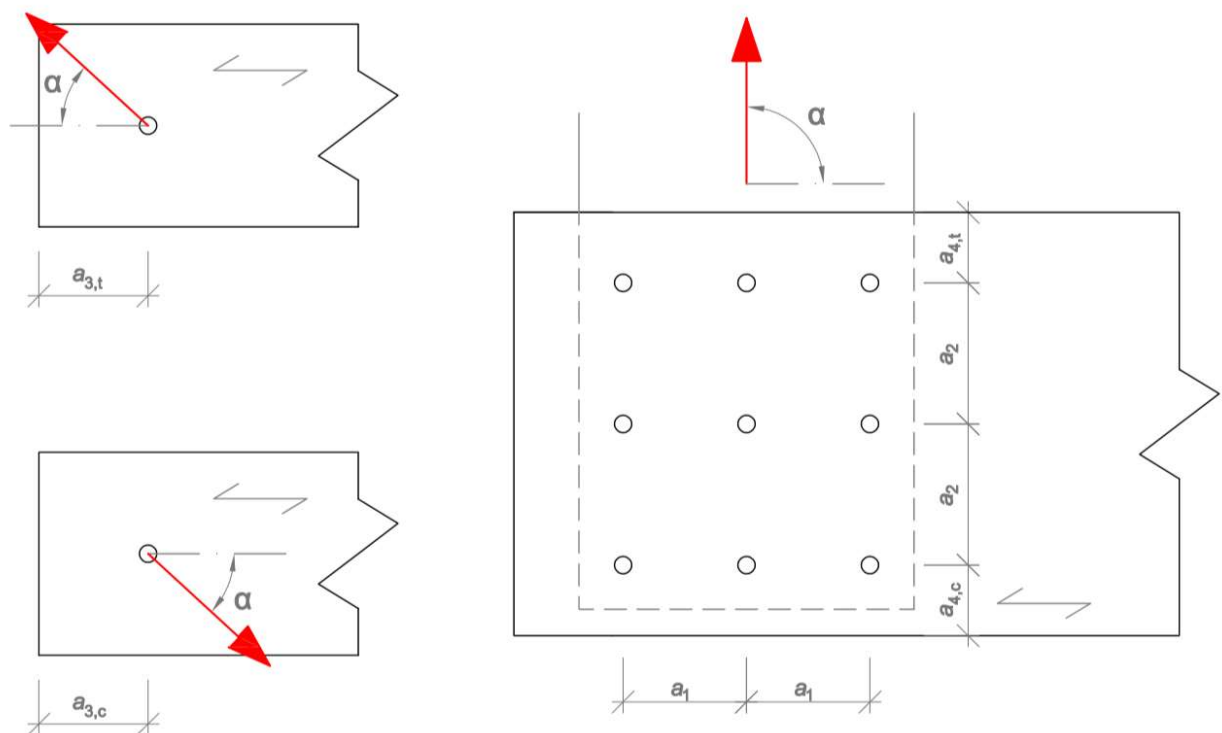


Abbildung 2-21: Skizze für die Mindestabstände der Stabdübel untereinander sowie von den Hirnholzenden und Rändern

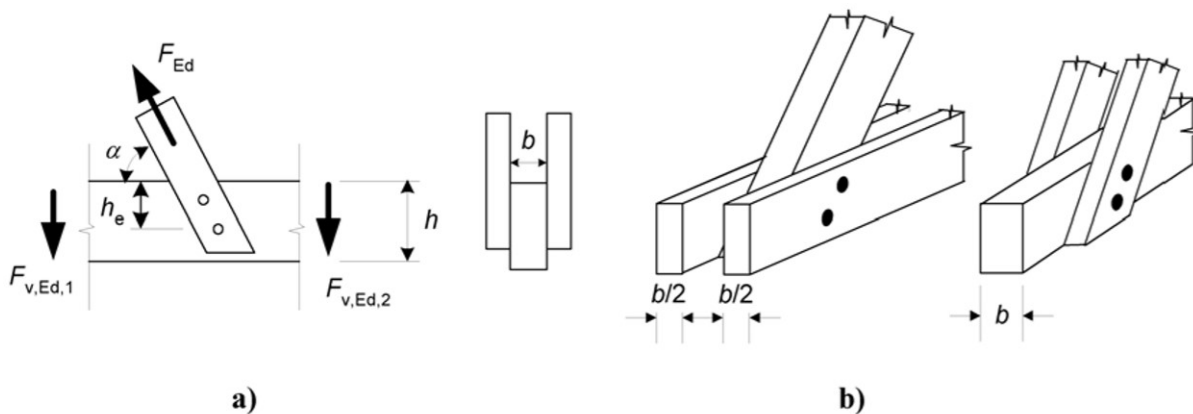
Tabelle 2-6: Mindestabstände für Stabdübelverbindungen in Abhängigkeit des Durchmessers; aus [35]

Bezeichnung	Richtung des Abstandes	Winkel zur Faserrichtung	Mindestabstände für Stabdübel
a_1	in Faserrichtung	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + 2 \cdot \cos\alpha) \cdot d$
a_2	normal zur Faserrichtung	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$
$a_{3,t}$	belastetes Ende	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max\{7d; 80 \text{ mm}\}$
$a_{3,c}$	unbelastetes Ende	$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ $150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$ $210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$a_{3,t} \cdot \sin\alpha$ $\max\{3,5d; 40 \text{ mm}\}$ $a_{3,t} \cdot \sin\alpha$
$a_{4,t}$	belasteter Rand	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max\{(2 + 2 \cdot \sin\alpha) \cdot d; 3d\}$
$a_{4,c}$	unbelasteter Rand	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

2-2.10 QUERBEANSPRUCHESTE STABDÜBELVERBINDUNGEN

Bei einer Beanspruchung der Verbindung quer zur Faser ergibt sich aufgrund der einwirkenden Kraft im rechten Winkel zur Faser noch die Problemstellung eines Quersugversagens. Zusätzlich zur Bemessung der Stabdübelverbindung nach Eurocode 5 [1] in Anlehnung an Johansen [2] (siehe Kapitel 2-2.5) sind für eine Beanspruchung quer zur Faser daher noch weitere Nachweise erforderlich.

Im Eurocode 5 der ÖNORM B 1995-1-1:2019 [1] wird die Gefahr des Quersugversagens bei einer Verbindung mit einer Kraft im Winkel zur Faser mit den nachfolgenden Formeln bestimmt. Der Anteil der einwirkenden Kraft, der quer zur Faser wirkt ($F_{Ed} \cdot \sin\alpha$), ist die Komponente, die dabei zu einem Quersugversagen führen kann (siehe Abbildung 2-22).


Abbildung 2-22: Skizze einer schräg angreifenden Kraft bei einer Stabdübel-Verbindung; aus [1]

Der Nachweis ist erfüllt, wenn die folgende Bedingung eingehalten wird:

$$F_{V,Ed} \leq F_{90,Rd} \quad (1.14)$$

$$F_{V,Ed} = \max \left\{ \begin{array}{l} F_{V,Ed,1} \\ F_{V,Ed,2} \end{array} \right\} \quad (1.15)$$

$$F_{90,Rd} = \frac{F_{90,Rk} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad (1.16)$$

$$F_{90,Rk} = 14bw \sqrt{\frac{h_c}{\left(1 - \frac{h_c}{h}\right)}} \quad (\text{für Nadelhölzer}) \quad (1.17)$$

$F_{V,Ed,1}$	Bemessungswert der Querkraft auf der linken Seite der Verbindung [N]
$F_{V,Ed,2}$	Bemessungswert der Querkraft auf der rechten Seite der Verbindung [N]
$F_{90,Rd}$	Bemessungswert der Querkzugtragfähigkeit [N]
$F_{90,Rk}$	charakteristischer Wert der Querkzugtragfähigkeit [N]
b	Dicke des Bauteils [mm]
w	Modifikationsbeiwert (für Stabdübel 1,0)
h_c	Abstand des am entferntesten angeordneten Verbindungsmittels vom beanspruchten Rand [mm]
h	Höhe des Bauteils [mm]
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für die Baustoffeigenschaft
k_{mod}	Modifikationsbeiwert für Lasteinwirkungsdauer und Feuchtegehalt

Der Nachweis ist also erfüllt, wenn die Querkraft auf der linken und rechten Seite des Anschlusses ($F_{V,Ed,1}$ und $F_{V,Ed,2}$, siehe Abbildung 2-22) geringer ist als die Querkzugtragfähigkeit $F_{90,Rd}$.

In der Formel für $F_{90,Rk}$, welche für Nadelhölzer ausgewiesen wird, sind nur der Abstand des am entferntesten angeordneten Stabdübels vom beanspruchten Rand sowie die Dicke und Höhe des Bauteils enthalten. Der Vorfaktor 14 stammt aus Berechnungen der Bruchmechanik. Für die Querkzugtragfähigkeit ist daher das Verhältnis h_c / h von großer Bedeutung. Somit hat die Lage des Stabdübels in Bezug auf die Querschnittshöhe einen Einfluss auf die Querkzugtragfähigkeit.

In Österreich gelten zusätzlich noch nachfolgende nationale Ergänzungen: [1] Das ausschlaggebende Kriterium für die Ergänzungen ist wiederum das Verhältnis vom Abstand des entferntesten angeordneten Verbindungsmittel vom beanspruchten Rand zur Bauteilhöhe. Dies wird in der nationalen Ergänzung jedoch mit a / h bezeichnet. In Abbildung 2-23 ist eine Skizze mit den Längenangaben für die ergänzenden Nachweise dargestellt.

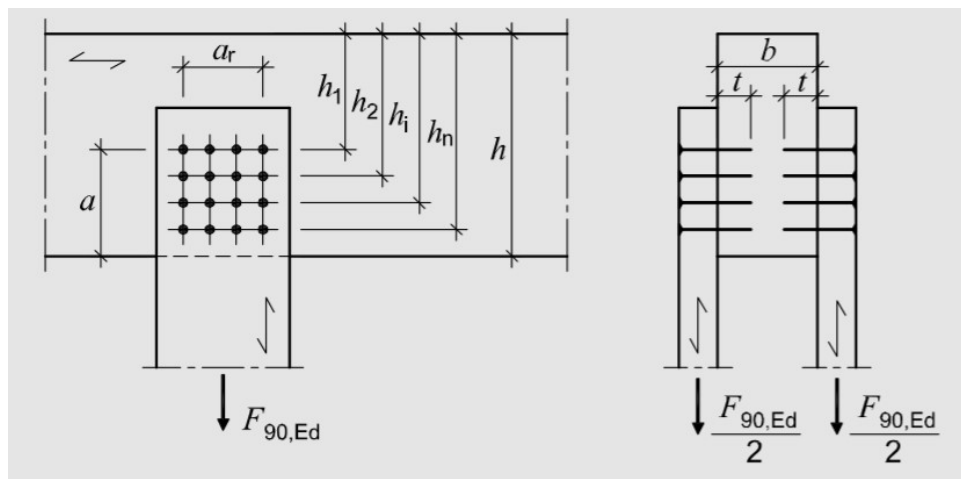


Abbildung 2-23: Skizze der Bezeichnungen des Queranschlusses der nationalen Ergänzung; aus [1]

Für Bauteile mit rechteckigem Querschnitt und einem Verhältnis von $a / h > 0,7$ darf der Nachweis der Querkzugtragfähigkeit entfallen. [1]

Für Bauteile mit rechteckigem Querschnitt und einem Verhältnis von $a/h \leq 0,7$ ist für den Nachweis der Querkzugtragfähigkeit wie folgt vorzugehen: [1]

$$F_{90,Ed} \leq F_{90,Rd} \quad (1.18)$$

$$F_{90,Rd} = k_s \cdot k_r \cdot \left(6,5 + \frac{18a^2}{h^2} \right) \cdot (t_{ef} \cdot h)^{0,8} \cdot f_{t,90,d} \quad (1.19)$$

$$k_s = 0,7 + \frac{1,4 \cdot a_r}{h} \geq 1 \quad (1.20)$$

$$k_r = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_1}{h_i} \right)^2} \quad (1.21)$$

- $F_{90,Ed}$ Bemessungswert der Querkzugkraft [N]
- $F_{90,Rd}$ Bemessungswert der Querkzugtragfähigkeit [N]
- t_{ef} wirksame Anschlusstiefe [mm]
- $f_{t,90,d}$ Bemessungswert der Zugfestigkeit rechtwinkelig zur Faser [N/mm²]
- a Abstand des am entferntesten angeordneten Verbindungsmittels vom beanspruchten Rand [mm]
- h Höhe des Bauteils [mm]
- a_r Abstand der äußersten Verbindungsmittel quer zur Beanspruchung [mm]
- n Anzahl der Verbindungsmittelreihen
- h_1 Abstand des nächstgelegenen angeordneten Verbindungsmittels vom unbeanspruchten Rand [mm]
- h_i Abstand des i -ten angeordneten Verbindungsmittels vom unbeanspruchten Rand [mm]

Die wirksame Anschlusstiefe t_{ef} ergibt sich dabei aus der Tabelle 2-7.

Tabelle 2-7: Wirksame Anschlusstiefen t_{ef} für unterschiedliche Anschlusstypen [1]

Art der Verbindung	Beidseitiger oder mittiger Queranschluss	Einseitiger Queranschluss
Stabdübel- und Bolzenverbindung	$t_{ef} = \min(b; 2t; 12d)$	$t_{ef} = \min(b; t; 6d)$

Die Variablen aus der Tabelle 2-7 bedeuten dabei:

- b Breite des Bauteils [mm]
- d Durchmesser des Verbindungsmittels [mm]
- t Eindringtiefe des Verbindungsmittels [mm]

Die nationale Ergänzung [1] enthält noch weitere Einschränkungen:

Für Abmessungen mit $a < 0,2h$ dürfen Queranschlüsse nur für kurze Lasteinwirkungen wie Windkräfte ausgeführt werden, Verbindungen mit $a_r > h$ und $F_{90,Ed} > 0,5F_{90,Rd}$ müssen verstärkt werden. [1]

In diesen Formeln ist ebenfalls die Geometrie der Verbindung (die Lage der Stabdübel) das maßgebende Kriterium. Aus den Einschränkungen lässt sich ableiten, dass die Gefahr eines Querkzugversagens bei Anschlüssen mit einem geringen Abstand zum belasteten Rand $a_{4,t}$ sowie bei einer Querkzugbelastung über einen längeren Bereich des Trägers tendenziell größer wird.

Um ein Aufspalten des Holzes bei einer Querkzugbeanspruchung zu verhindern, sind nachfolgend in Anlehnung an das Skriptum Holzbau der TU Graz [33] ein paar mögliche Maßnahmen angeführt:

- Vergrößerung der Abstände der Verbindungsmittel,
- gleichmäßigere Verteilung der Spreizkräfte bei mehreren kleineren Verbindungsmittel,
- örtliche Verstärkung durch beidseitig aufgeklebte Querabsperungen (z. Bsp. Sperrholz),
- Vollgewindeschrauben als Querkzugsicherung, und
- Ersatz des Holzes im Anschlussbereich durch ein höherwertiges Produkt (z. Bsp. Furniersperrholz).

2-3 BEMESSUNGSANSATZ NACH GEHRI

In diesem Abschnitt wird der bereits erwähnte ingenieurmäßige Ansatz von Gehri [3] näher vorgestellt. Bei Stabdübelverbindungen ist in Abbildung 2-24 im Last-Verschiebungsdiagramm nach dem anfangs linearen Bereich ein Knickpunkt, der den Anriss des Holzes im Bereich des Stabdübels markieren soll. Dieser erste Anriss ist wichtig für die Bemessung der Verbindung, da eine Laststeigerung zwar noch möglich ist, diese jedoch zu einer Vergrößerung des Risses und eines möglichen plötzlichen Versagens der Verbindung führt. Zu beachten ist, dass es sich bei diesem Anriss um eine Mikro-Fraktur handelt, die mit freiem Auge nicht erkennbar ist. Die Tragfähigkeit der Verbindung ist daher nach dem Ansatz von Gehri [3] beim Erreichen des Anriss-Punktes ausgeschöpft. Die rote Funktion in Abbildung 2-24 stellt eine Beanspruchung in Faserrichtung dar, die grüne Funktion senkrecht zur Faser. In Faserrichtung ist eine plastische Verformung möglich, senkrecht zur Faser wird ein sprödes Verhalten mit geringer Verformungskapazität angenommen. Die Lage des Stabdübels im Holz ist von geringer Bedeutung, Gehri [3] geht davon aus, dass für den ersten Anriss - sofern die Lage des Schwerpunktes der Verbindung nicht oberhalb der Mittelachse liegt - nicht die Lage des Stabdübels und der daraus resultierende Abstand $a_{4,t}$ sondern die lokalen Holzeigenschaften im Bereich des Stabdübels maßgebend sind. Somit ist die Rohdichte der lokalen Holzlamelle ein wichtiger Einflussfaktor für die Anrisslast.

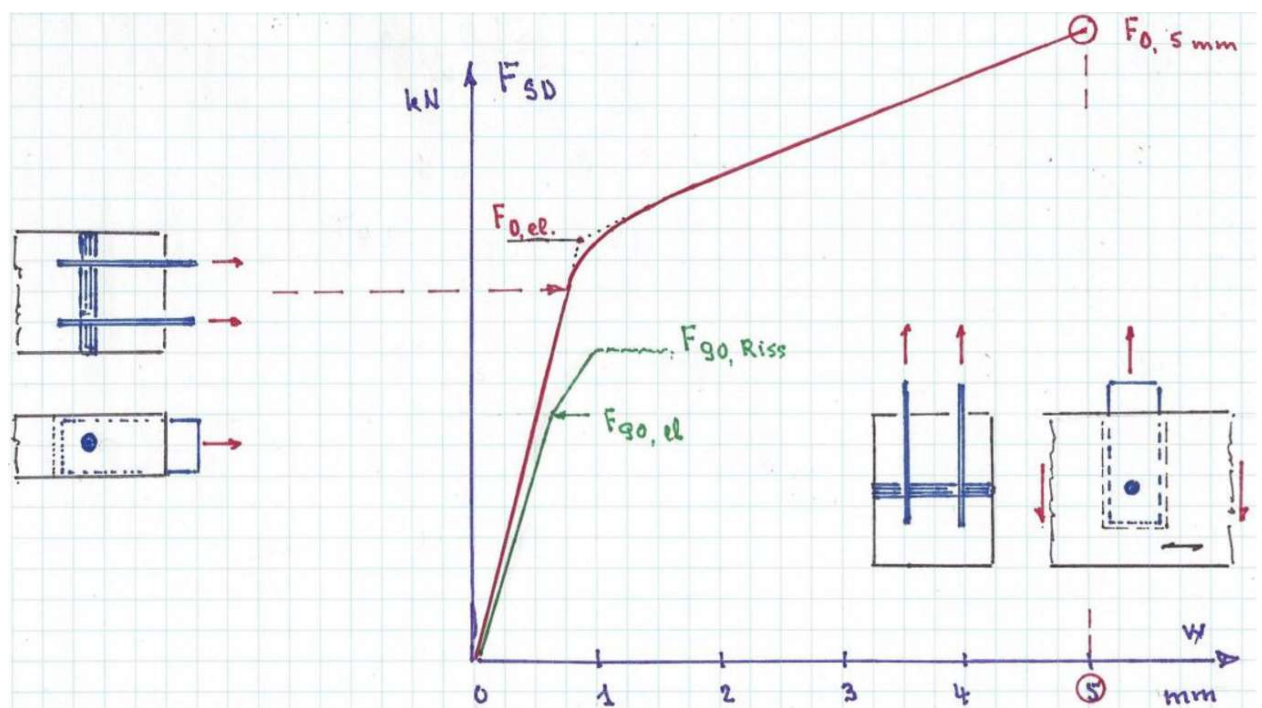


Abbildung 2-24: Skizze des Last-Verschiebungsdiagramms von Stabdübelverbindungen mit der Kennzeichnung der Anrisslast von Gehri; aus [3]

Die Kraft bei diesem Anriss wird als $F_{90,\text{Riss}}$ bezeichnet und soll durch eine einfache Funktion ausgedrückt werden können. [3]

$$F_{90,\text{Riss}} = \text{Faktor} \cdot d^2 \quad (1.22)$$

$F_{90,\text{Riss}}$ Kraft beim ersten Anriss [kN]

d Durchmesser des Stabdübels [mm]

Der Faktor in der Gleichung hängt von den Materialparametern wie Holzart, Rohdichte und der Schlankheit der Seitenhölzer ab. Für Buchenholz hat Gehri [3] diesen Faktor für eine Schlankheit größer oder gleich 2,5 mit 0,18 ermittelt, siehe Abbildung 2-25.

$$F_{90,\text{Riss,Buche}} = 0,18 \cdot d^2 \quad [\text{kN}] \quad (1.23)$$

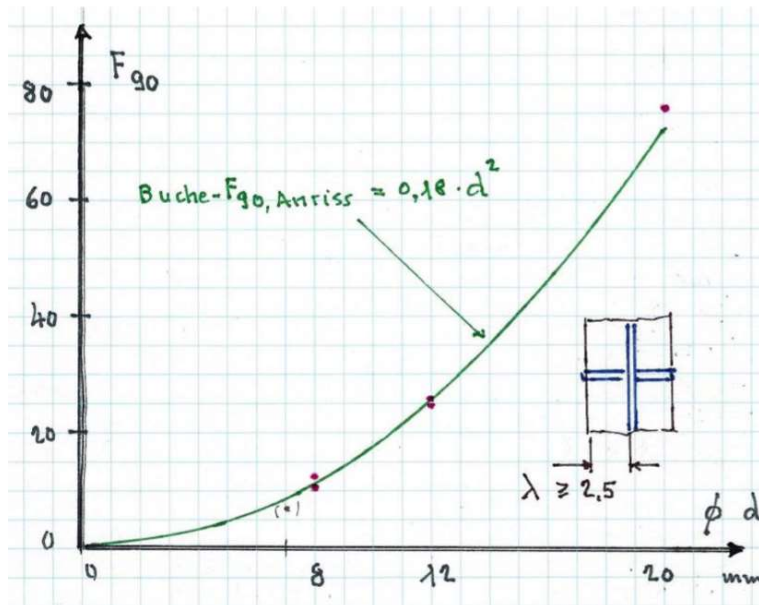


Abbildung 2-25: Funktion der Anrisslast für Buche in Abhängigkeit des Durchmessers; aus [3]

Zu beachten ist, dass diese Funktion nur vom Durchmesser des Stabdübels abhängt, die Schlankheit der Verbindung soll jedoch für eine allgemein gültige Aussage berücksichtigt werden, durch eine Umformung kann man die Anrisslast auch als Lochleibungsspannung ausdrücken.

$$F_{90,\text{Riss}} = \lambda \cdot d^2 \cdot f_{h,90,\text{Riss}} \quad (1.24)$$

$$f_{h,90,\text{Riss}} = \frac{F_{90,\text{Riss}}}{\lambda \cdot d^2} \quad (1.25)$$

$f_{h,90,\text{Riss}}$ Lochleibungsspannung beim ersten Anriss [N/mm²]

Für diese Überlegungen ist die Schlankheit ein wichtiger Parameter. Die Lochleibungsspannung bleibt über die gesamte Stabdübel-Länge konstant, bis der erste Anriss erfolgt, das heißt der Stabdübel bleibt bis zum Anriss unverformt. Bei einer zu großen Schlankheit stellt sich ein Fließgelenk im Stabdübel ein, das größere Verformungen verursacht und dadurch unweigerlich zum Anriss führt. [3] Der Grenzwert für die Schlankheit, bei der ein Fließmoment entsteht, wird als λ_{e1} bezeichnet. Eine Vergrößerung der Schlankheit über diesen Grenzwert hinaus führt lt. Gehri [3] zu keiner Steigerung der Anrisslast. Die Durchrisslast (maximale Kraft) kann jedoch noch gesteigert werden. [3]

Die obigen Anforderungen an Stabdübelverbindungen stellen jedoch ein Problem dar. Einerseits sollen nach Möglichkeit zwei Fließgelenke im Stabdübel entstehen, um das volle Tragfähigkeits-Potential nach der Johansen-Theorie [2] auszunutzen. Andererseits entsteht bei einer Fließgelenks-Bildung bereits ein Anriss bei einer Belastung quer zur Faser. Dieses Problem könnte mit folgendem Ansatz von Gehri [3] behoben werden. Wenn Stabdübelverbindungen eine ausreichende Duktilität aufweisen sollen, wird bisweilen immer von plastischen Verformungen der Stabdübel ausgegangen. Diese Fließgelenksbildung führt jedoch zu einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung entlang des Stabdübels und damit zur lokalen Schädigung des Holzes im Anschlussbereich. Mit der GSA-Technologie von Gehri [3], das sind eingeklebte Anker, gelingt es Gehri [3] bereits, duktile Biegestöße mit höchster Leistung herzustellen, dabei bleibt die Verbindung von Holz und Anker intakt, die Verformung stellt sich nur im Stahl ein. Um dieses System weiter zu denken, hat Gehri [3] den Ansatz, die Verformung durch geschickte Auslegung der Stabdübel und Stahlteile nur im Stahlteil zu erlauben, das Holz bleibt unbeschädigt. Dabei bleiben die Stabdübel im elastischen Bereich und die Zwischenbleche können plastische Lochaufweitungen erfahren. [3]

2-4 VERGLEICH DES EUROCODE 5 MIT DEM ANSATZ VON GEHRI

In der Nachweisführung für eine querbeanspruchte Verbindung nach Eurocode 5 [1] ist die Position des Stabdübels relevant. Je nach Lage des Stabdübels zum beanspruchten Rand $a_{4,t}$ sind bestimmte Maßnahmen erforderlich (Querzugverstärkung etc.), die Bemessung erscheint komplex. In den Nachweisen nach Johansen [2] sind Fließgelenksbildungen möglich bzw. erwünscht, in den Formeln zur Querbeanspruchung ist kein Kriterium diesbezüglich vorhanden.

Gehri [3] hingegen vertritt den Ansatz, dass die Lage des Stabdübels für den ersten Anriss (und somit für die Tragfähigkeit) irrelevant ist. Sein Konzept beruht auf einer einfachen Funktion, die bei Einhaltung gewisser Rahmenbedingungen (Schlankheit, Rohdichte) lediglich vom Durchmesser des Stabdübels abhängig ist. Der Nachteil in Gehri's [3] Ansatz ist, dass die Tragfähigkeit erreicht ist, sobald ein Fließgelenk im Stabdübel entsteht (die Verformung sollte nur im Stahlteil entstehen). Die Folgen bezüglich der Wirtschaftlichkeit der Konstruktion sind hier jedoch noch zu diskutieren.

2-5 FORSCHUNGSFRAGE

Im Rahmen dieser Arbeit soll durch experimentelle Versuche Gehri's [3] Ansatz überprüft werden. Dafür ist die korrekte Erfassung des ersten Anrisses wichtig. Für diese Ermittlung sind nachfolgende Parameter zu berücksichtigen:

- Materialeigenschaften des Anschlussbereiches (Holzart, Dichte, Feuchte)
- Stabdübel-Kennwerte (Stahlgüte, Durchmesser)
- Schlankheit der Verbindung
- Passgenauigkeit (Lochspiel im Blech, vor allem bei Gruppenwirkung!)

Unter Berücksichtigung der hier genannten Parameter konnten folgende Forschungsfragen herauskristallisiert werden:

- a) Wie kann der erste Anriss messtechnisch eindeutig erfasst werden?
- b) Ist für eine querbeanspruchte Stabdübelverbindung die Lage des Stabdübels in Bezug auf die Querschnittshöhe relevant?
- c) Wie wirken sich die verschiedenen Parameter (Schlankheit, Durchmesser, Abstand zum belasteten Rand, Zwischenabstand) auf die Anrisslast aus?
- d) Kann das Tragverhalten einer querbeanspruchten Stabdübelverbindung in Birkenholz mit nur einer Formel mit einem noch zu bestimmenden Faktor dargestellt werden?

KAPITEL 3: MATERIAL UND METHODEN

3-1 ÜBERBLICK

Wie in Abschnitt 2-5 zusammenfassend festgestellt, ist es das Ziel dieser Arbeit, das Verhalten von in Birken-Brettschichtholz situierten Stahlblech-Holz-Stabdübelverbindungen bei einer Beanspruchung quer zur Faserrichtung experimentell zu untersuchen. Der in diesem Zuge umgesetzte Prüfplan kann in Vorversuche und Hauptversuche unterteilt werden.

3-1.1 VORVERSUCHE

Als Eingangskenngröße für die Abschätzung der Tragfähigkeit der querbeanspruchten Stabdübelverbindung gem. der Johansen-Theorie [2] wurde im Rahmen einer Vorversuchsreihe das Fließmoment der für die Hauptversuche eingesetzten Stabdübel gem. ÖNORM EN 409 [37] bestimmt. Ein Überblick des durchgeführten Prüfprogramms ist Tabelle 3-1 zu entnehmen. Die dabei angewandte Methodik der Durchführung und Auswertung wird in Abschnitt 3-3.1 näher erläutert.

Tabelle 3-1: Übersicht der durchgeführten Fließmoment-Vorversuche

Nenndurchmesser d [mm]	8	12*	16
Anzahl der Versuche [-]	10	10	10
* aus Eckerstorfer [7] entnommen, da dieselben Stabdübel mit $d = 12$ mm verwendet wurden.			

3-1.2 HAUPTVERSUCHE

Eine schematische Darstellung der Prüfkonfiguration, welche für die Bestimmung des Last-Verschiebungsverhaltens der querbeanspruchten Stabdübelverbindungen verwendet wurde, ist in Abbildung 3-1 illustriert. Wie darin ersichtlich ist, wurde dabei die Stabdübelverbindung, mittig am Brettschichtholz-Träger situiert, an die Lastaufnahme der Prüfmaschine angeschlossen und mittels vertikaler Verschiebung der Lastaufnahme beansprucht. Die Lagerung an den beiden Enden des BSH-Prüfkörpers erfolgte via Kontaktpressung gegen Widerlager, welche an den Auflagerbalken der Prüfmaschine angeschlossen waren. Die Lasteinleitungs- und Lagerungskonfiguration entsprach somit dem „Push-Pull“-Prinzip, welches für gewöhnlich für Prüfungen von Verbindungen angewendet wird. Details zur Prüfkonfiguration sind Abschnitt 3-3.2 bzw. in den Plänen im Anhang 5-1.2B-2 zu entnehmen.

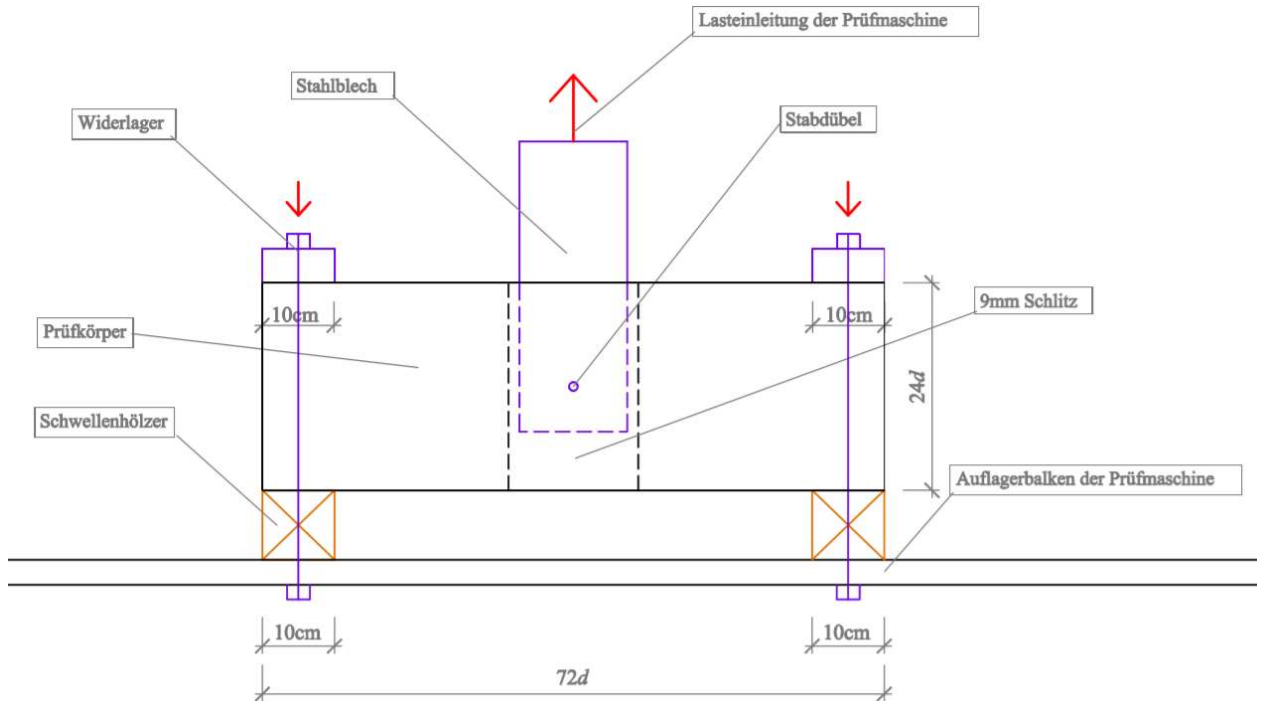


Abbildung 3-1: schematische Skizze der Prüfkongfiguration zur Bestimmung des Last-Verschiebungsverhaltens der querbeanspruchten Stabdübelverbindungen

Im Rahmen der Hauptversuche wurden die folgenden Einflussparameter festgehalten:

- | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| • Typ der Verbindung: | zweischnittige, innenliegende Stahlblech-Holz-Stabdübelverbindung |
| • Holzwerkstoff: | Brettschichtholz aus Birke |
| • Rohdichte: | 1 Rohdichteklasse mit $\rho_{\text{mean}} \approx 600 \text{ kg/m}^3$ |
| • Stahlgüte der Stabdübel: | S355 |
| • Anzahl an Stabdübelreihen: | 1 Reihe |
| • Last-Faserwinkel: | $\alpha = 90^\circ$ |
| • Belastungsart: | quasi-statisch |
| • geschätzte Dauer bis zum Versagen: | $300 \pm 120 \text{ s}$ |

In Hinblick auf die in Kapitel 2: festgestellten, zu erwartenden Einflussparameter wurden im Zuge der Hauptversuche die folgenden Variationen untersucht:

- | | |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| • Nenndurchmesser der Stabdübel: | $d = \{8, 12, 16\} \text{ mm}$ |
| • Schlankheit der Stabdübel: | $\lambda = \{2,5; 5,0\}$ |
| • Lage der Dübel in Abhängigkeit der Trägerhöhe: | oben mittig unten bzw.
$a_{4,t} = \{4, 12, 20\} d$ |
| • Anzahl an Stabdübel in der Reihe: | $n = \{1, 3\}$ |
| • Zwischenabstand der Dübel parallel zur Faserrichtung: | $a_1 = \{7, 9, 11\} d$ |

Unter Zugrundelegung von 5 bis 10 Versuchen je Parameterkonfiguration hätte eine vollständige Variation sämtlicher Einflussparameter zu einem Prüfumfang von insgesamt 360 bis 720 Versuchen geführt. Um das entsprechende Ausmaß zu reduzieren, wurde das folgende adaptive Vorgehen gewählt:

1. Variation der Seitenholzschlankheit λ und Abstand zum beanspruchten Rand $a_{4,t}$

Mit einem Stabdübel ($n = 1$) mit $d = 12$ mm wurden die beiden Parameter Seitenholzschlankheit sowie Abstand zum beanspruchten Rand variiert. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen wurde dann im Zuge der nachfolgenden Untersuchungen ein fester Wert für die Seitenholzschlankheit und den Randabstand festgelegt.

2. Variation des Nenndurchmessers d und des Abstands a_1 für $n = 3$ Stabdübel

Mit der im ersten Schritt gewählten Seitenholzschlankheit und dem festgelegten Randabstand wurden dann der Nenndurchmesser d der Stabdübel sowie der Abstand a_1 variiert.

In Tabelle 3-2 ist folglich das gesamte Prüfprogramm der Hauptversuche zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3-2: *Zusammenfassung des Prüfprogramms der Hauptversuche*

Serie [-]	d [mm]	λ [-]	Lage [-]	n [-]	a_1 [d]	Versuche [-]
B1-1	12	2,5	oben	1		10
B1-2	12	5,0	oben	1		10
B1-4	12	2,5	mittig	1		11
B1-5	12	5,0	mittig	1		10
B1-7	12	2,5	unten	1		10
B1-8	12	5,0	unten	1		10
B2-2	12	2,5	mittig	3	7	5
B2-4	12	2,5	mittig	3	9	5
B2-6	12	2,5	mittig	3	11	5
B4-1	8	2,5	mittig	3	7	5
B4-2	8	2,5	mittig	3	9	4
B4-3	8	2,5	mittig	3	11	5
B4-4	16	2,5	mittig	3	7	5
B4-5	16	2,5	mittig	3	9	5
B4-6	16	2,5	mittig	3	11	5
B6-1	8	2,5	mittig	1		10
B6-2	16	2,5	mittig	1		10
					Summe:	125

Als wesentliche Kenngröße für die weitere Prüfplanung (Auswahl des Materials und der Prüfmaschine, Planung der Prüfkongfiguration, etc.) wurde in einem ersten Schritt die für das dargelegte Prüfprogramm maßgebende resultierende Beanspruchung (Prüfkraft F_{\max}) bestimmt. Dies erfolgte gem. dem in Kapitel 2-3 diskutierten Berechnungsmodell von Gehri [3] für die Maximalausprägung von d und n :

$$F_{\max} = 0,18 \cdot d^2 \cdot n = 0,18 \cdot 16^2 \cdot 3 = 138,24 \text{ kN} \quad (1.26)$$

F_{\max} maximale Prüfkraft [kN]
 d Durchmesser des Stabdübels [mm]

3-2 MATERIAL

In den folgenden Unterabschnitten 3-2.1 bis 3-2.3 sind die für die Umsetzung des experimentellen Programms eingesetzten Materialien näher erläutert.

3-2.1 BIRKEN-BRETTSCHICHTHOLZ

3-2.1.1 Prüfkörperdimensionierung

Zur Bestimmung der notwendigen Menge an Birken-Brettschichtholz, war es in einem ersten Schritt notwendig, die Dimension der Prüfkörper zu bestimmen. Dies betraf einerseits die für die Umsetzung der in Abschnitt 3-1.2 ausgewiesenen Parametervariation notwendigen Mindestquerschnitte und andererseits die Länge der Prüfkörper, welche von der in Abbildung 3-1 schematisch illustrierten Prüfkongfiguration abhing.

Querschnitte der Birken-BSH-Prüfkörper

Der gemäß der in Abschnitt 3-1.2 ausgewiesenen Parametervariation resultierende Querschnitt der Birken-BSH-Prüfkörper ist schematisch in Abbildung 3-2 illustriert. Unter Berücksichtigung der gewählten Variation des Randabstandes $a_{4,t}$ und der Seitenholz-Schlankheit λ resultierten parametrische Querschnittsabmessungen von $b / h = (2 \cdot \lambda_{\max} + t) \cdot (a_{4,t,\max} + 4d)$, welche in Tabelle 3-3 in Abhängigkeit des Nenndurchmessers zahlenmäßig aufgelistet sind. Für die Stahlbleche wurde eine Stärke von 8 mm definiert, bei einem Spiel von 1 mm ergibt sich eine Schlitzbreite $t = 9$ mm.

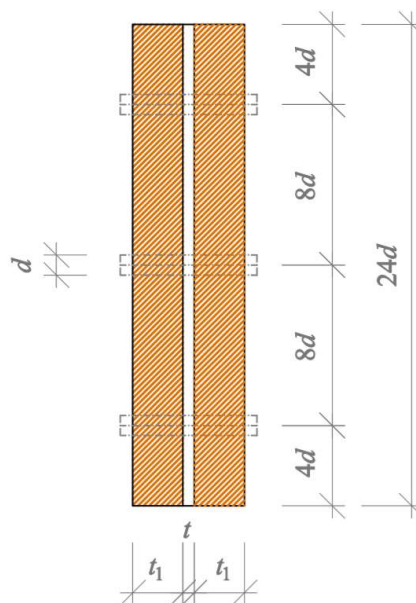


Abbildung 3-2: parametrisierter Querschnitt der Birken-BSH-Prüfkörper

Tabelle 3-3: Darstellung der Dimensionen sämtlicher verwendeter Querschnitte in den Hauptversuchen

Durchmesser	Schlankheit	Schlitz	Höhe	Höhe	Breite	Breite
d [mm]	λ [-]	t [mm]	h [-]	h [mm]	b [-]	b [mm]
8	2,5	9	$24d$	192	$2 \cdot 2,5d + t$	49
12	2,5	9	$24d$	288	$2 \cdot 2,5d + t$	69
12	5	9	$24d$	288	$2 \cdot 5d + t$	129
16	2,5	9	$24d$	384	$2 \cdot 2,5d + t$	89

Gesamtlänge der Birken-BSH-Prüfkörper

Zur Bestimmung von durch die Lagerung unbeeinflussten Anrisslasten der querbeanspruchten Stabdübelverbindungen war es notwendig, eine direkte Weiterleitung der Beanspruchungen in die Widerlager der Prüfkfiguration (siehe Abbildung 3-1) zu vermeiden. Der dafür notwendige Mindestabstand zwischen Stabdübel-Verbindung und Widerlager wurde mittels einer Finite-Elemente (FE)-Studie mit der Software-Applikation RFEM (Version 5.14) ermittelt, welche im Folgenden kurz zusammengefasst ist.

Randbedingungen des in Abbildung 3-3 dargestellten FE-Modells:

- Anzahl Stabdübel: $n = 1$ Stabdübel
- Durchmesser: $d = 16$ mm
- Lage: mittig ($a_{4,t} = 12d$)
- BSH-Prüfkörper: 2D-Flächenelement, orthotrop elastisch (Anm.: es wird vorausgesetzt, dass die Breite keinen Einfluss auf die Lastverteilung hat)
- Stabdübel: Modellierung mit rotierten Balkenstäben, Ausfall unter Zug soll eine Lochleibungsbeanspruchung simulieren
- Lagerung: 10 cm Auflagerlänge an der Oberkante mittels gelenkiger, vertikaler Linienlager, seitliche Lagerung an den Rändern ausschließlich zur Stabilisierung des FE-Modells
- System: Einfeldträger
- Material: Laubholz D30 gem. ÖNORM EN 338 [38] bzw. Stahlgüte S355
- Höhe: $24 d$ ($24 * 16$ mm = 384 mm)
- Kraft: vertikale Einzellast mit $F = 46$ kN (gem. Gleichung 1.26 für $n = 1$)

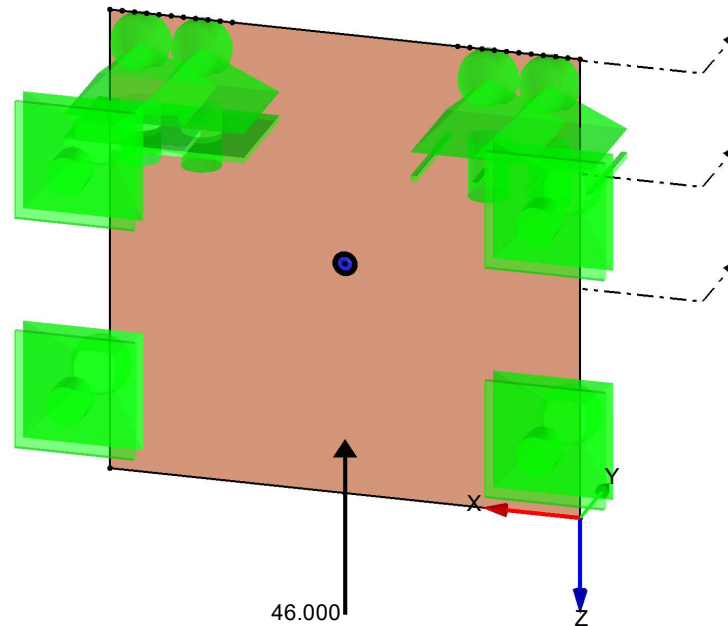


Abbildung 3-3: *RFEM-Modell zur Bestimmung des Mindestabstandes zwischen Stabdübel-Verbindung und Widerlager*

Die Einleitung einer Punktbelastung führt im FE-Modell zu ungewollten Spannungsspitzen. Um die Lasteinleitung in die Lochwandung mit der Charakteristik einer Stabdübel-Beanspruchung zu simulieren, wurden 36 kleine Balkenstäbe aus Stahl S355 in der Loch-Öffnung um jeweils 10° rotiert, siehe Abbildung 3-4. Den Balkenstäben wurde die Eigenschaft zugewiesen unter Zug auszufallen, somit entstehen nur Druckspannungen in der belasteten Hälfte der Lochwandung. Im Bereich der Lasteinleitung wurde eine Verfeinerung des Berechnungsnetzes durchgeführt. Die Spannungsverteilung im Bereich der Lochleibungsbeanspruchung ist in Abbildung 3-4 gut ersichtlich, oben ist rot die Druckbelastung zu erkennen. In den seitlichen Bereichen ca. 45° von der vertikalen abweichend sind die Querszugbelastungen die zum Aufspalten des Holzes führen erkennbar.

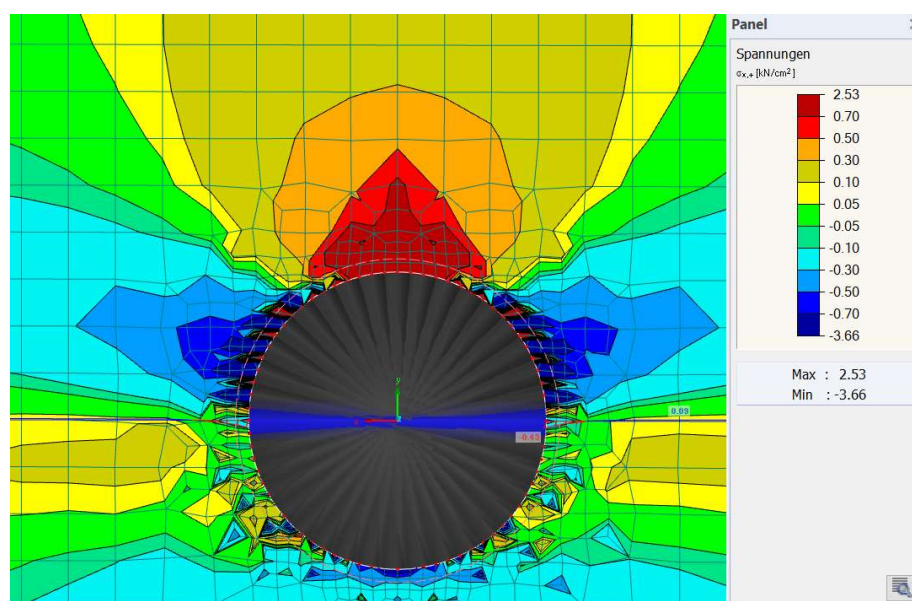


Abbildung 3-4: *Modellierung der Lochleibungsbeanspruchung mit rotierten Balkenstäben bei einer $\sigma_{x,+}$ Spannungsdarstellung*

Die Bestimmung des benötigten Mindestabstandes erfolgte mit einem schrittweisen Vorgehen.

Zu Beginn wurden die Auflager direkt aneinandergelegt, was einer durchgehenden Lagerung an der Oberkante der 2D-Fläche entspricht, vgl. Abbildung 3-5. Anschließend wurde die gesamte Länge des Prüfkörpers in $0,5 h$ - Schritten so lange erhöht, bis keine Veränderungen in der Größe und Verteilung der Querbeanspruchungen in der Ebene des Stabdübels festzustellen waren, vgl. Abbildung 3-7. Bei den Systemen mit kürzeren Längen ist, wie in Abbildung 3-6 ersichtlich ist, die direkte Einleitung der Kraft in die Auflager deutlich erkennbar. Bei größeren Abständen, wie in Abbildung 3-7 dargestellt, kann das augenscheinlich nicht mehr beobachtet werden.

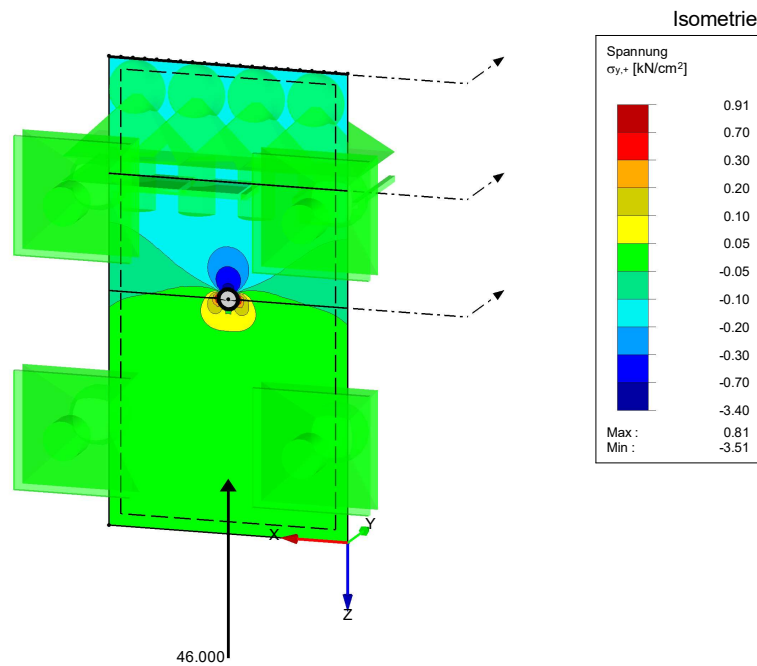


Abbildung 3-5: Verteilung der $\sigma_{y,+}$ Spannungen im RFEM Modell mit kontinuierlicher Lagerung an der Oberkante ($l = 20 \text{ cm}$)

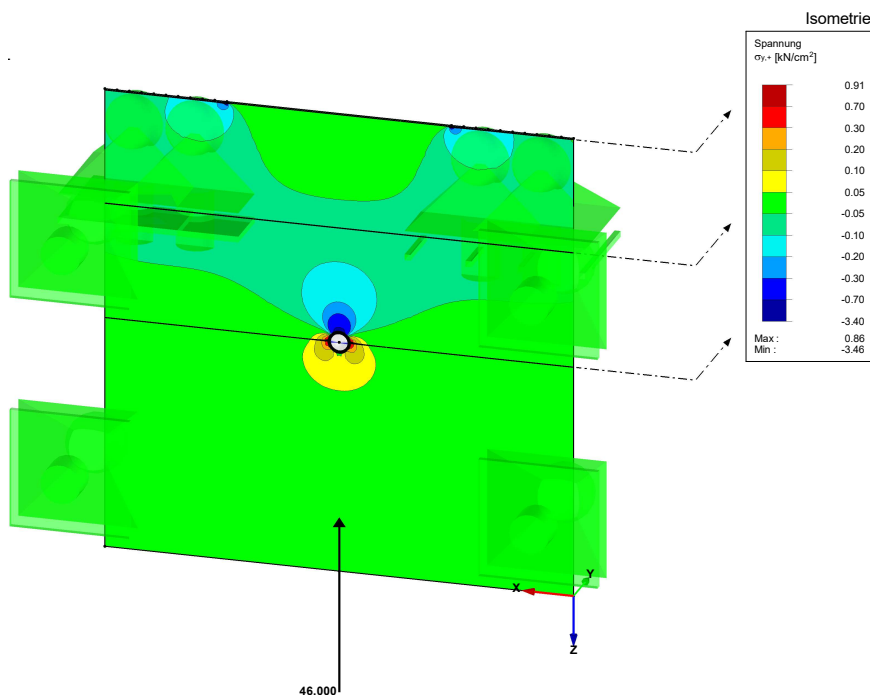


Abbildung 3-6: Verteilung der $\sigma_{y,+}$ Spannungen im RFEM Modell mit Lagerung an der Oberkante ($l = h$)

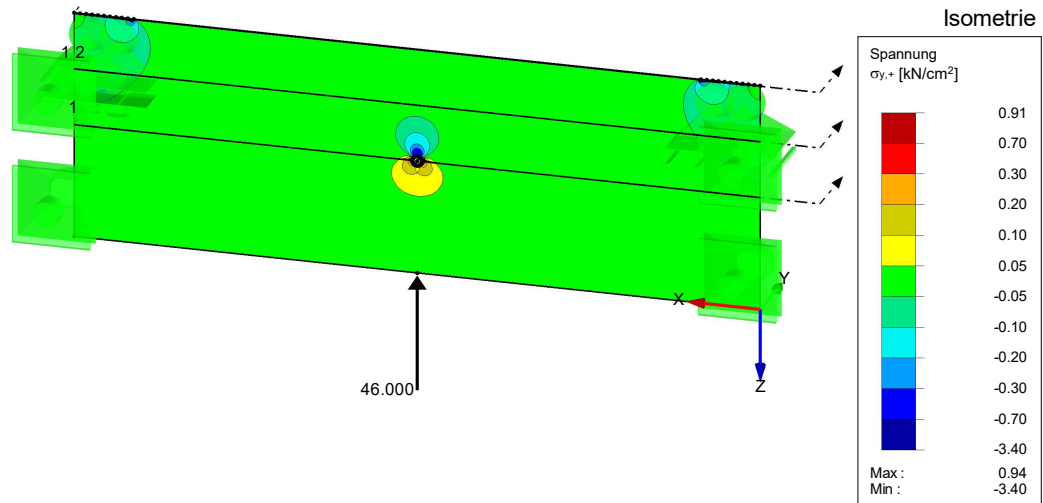


Abbildung 3-7: Verteilung der $\sigma_{y,+}$ Spannungen im RFEM Modell mit ausschließlich randnaher Lagerung an der Oberkante ($l = 3h$)

Für die Schaffung einer quantifizierbaren Entscheidungsgrundlage bezüglich der notwendigen Prüfkörperlänge wurden für alle Modellschritte die Querspannungen in einem horizontal mittig platzierten Schnitt durch den Stabdübel ausgelesen, siehe Abbildung 3-8. Darin sind die Querzugspannungen nahe des Stabdübels, die zum Aufreißen des Holzes führen, deutlich erkennbar, während an den Schnittenden Querdruckspannungen zu beobachten sind. In Tabelle 3-4 sind folglich die damit ermittelten Parameterwerte in Abhängigkeit der verschiedenen Modelllängen dargestellt.

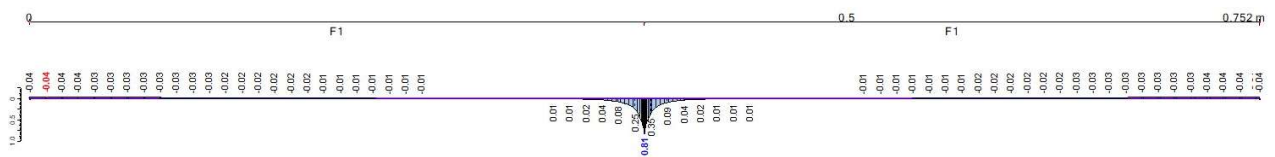


Abbildung 3-8: beispielhafter Ergebnisverlauf der Querspannungen entlang des horizontal mittig platzierten Schnitts

Tabelle 3-4: Zusammenfassung der Schnittergebnisse (Bereich der Querzugspannungen) in Abhängigkeit der Prüfkörperlänge

Länge des Probekörpers	20 cm	1,0 h	1,5 h	2,0 h	2,5 h	3,0 h	3,5 h	4,0 h
Spannungsspitze (Maximalwert) [N/mm ²]	6,7	7,5	7,9	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1
Fläche unter der Kurve [N/mm]	29	37,85	45,55	52,45	57,75	58,90	59,55	57,75
Länge unter Querzug je Seite [mm]	20	30	46	68	92	111	112	112

Nachfolgend sind in den Diagrammen in Abbildung 3-9, Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 die Größe der Spannungsspitze, die Fläche unter der Kurve sowie die Länge des querzugbeanspruchten Bereichs in Abhängigkeit der Trägerlänge ausgewiesen. Daraus wird ersichtlich, dass ab einer Gesamtlänge des Probekörpers von $3h$ ein mehr oder weniger konstanter Verlauf sämtlicher Kennwerte zu beobachten ist. Dies zum Anlass nehmend, wurde der Abstand des (äußersten) Stabdübels (bei $n = 3$) bis zum Hirnholzende des Probekörpers mit $1,5h$ gewählt.

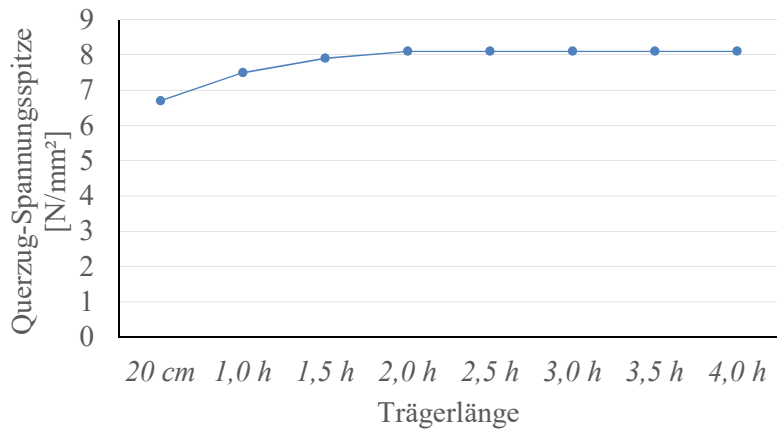


Abbildung 3-9: **Größe der stabdübelnahen Querzug-Spannungsspitze in Abhängigkeit der Trägerlänge**

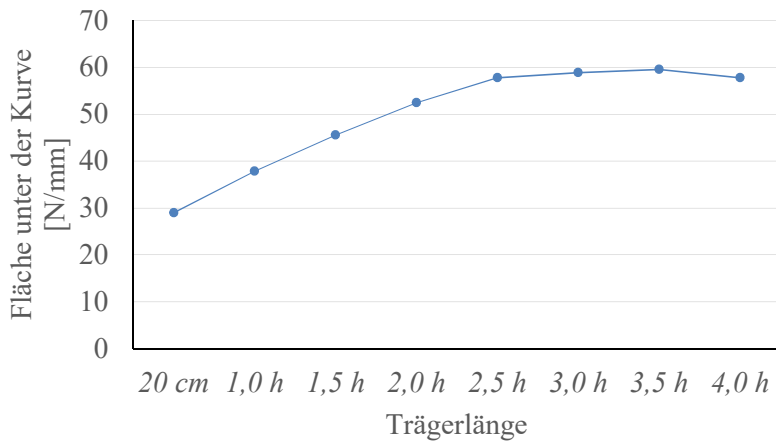


Abbildung 3-10: **Größe der Fläche unter der Kurve in Abhängigkeit der Trägerlänge**

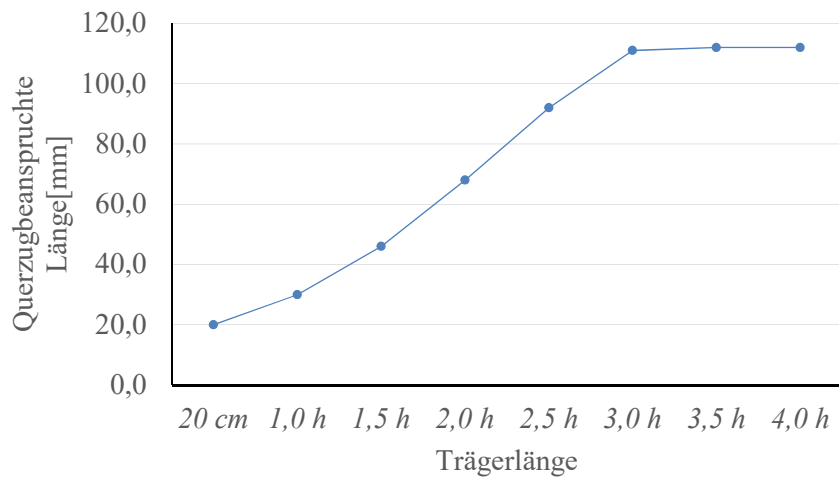


Abbildung 3-11: **Querzugbeanspruchte Länge in Abhängigkeit der Trägerlänge**

Mit der aus dieser FE-Studie ermittelten parametrischen Länge können die Abmessungen für alle Prüfserien bestimmt werden, siehe Tabelle 3-5.

Tabelle 3-5: Übersicht der Abmessungen sämtlicher Prüfkörper-Typen

Serie	Durchmesser	Höhe	Breite	Länge
[-]	d [mm]	h [mm]	b [mm]	l [mm]
B1-1, B1-4, B1-7	12	288	69	864
B1-2, B1-5, B1-8	12	288	129	864
B2-2	12	288	69	1032
B2-4	12	288	69	1080
B2-6	12	288	69	1128
B4-1	8	192	49	688
B4-2	8	192	49	720
B4-3	8	192	49	752
B4-4	16	384	89	1376
B4-5	16	384	89	1440
B4-6	16	384	89	1504
B6-1	8	192	49	576
B6-2	16	384	89	1152

3-2.1.2 Prüfkörperherstellung

Um zumindest im Bereich der Stabdübelverbindung das Vorkommen von Holzmerkmalen (Äste, Harz, etc.) möglichst ausschließen zu können, wurde entschieden, die Brettschichtholz-Prüfkörper selbst herzustellen. Dieser Prozess ist im Folgenden kurz zusammengefasst.

Holzsortierung

Die Brettware für die Herstellung der Prüfkörper wurde im Werk der Firma Hasslacher Norica Timber in Sachsenburg (Kärnten) händisch ausgewählt. Augenmerk bei der Sortierung wurde auf kernfreie Ware, gerader Wuchs, ebene Querschnitte, keine bzw. geringe Schwindrisse, sowie Bretter mit möglichst wenigen Ästen gelegt. Ferner wurde Brettware mit einer Stärke von $t = 46$ mm in drei verschiedenen Breiten und Längen für eine möglichst ressourcenschonende Prüfkörperherstellung gewählt. Wie in Tabelle 3-6 erkennbar ist, wurde so eine Gesamtmenge von $10,56 \text{ m}^3$ bezogen (siehe Abbildung 3-12), welche vor der Anlieferung noch auf eine Zielholzfeuchte von 10 % getrocknet wurde.

Tabelle 3-6: *Stückliste der Birkenbretter als Grundmaterial für die Herstellung der BSH-Prüfkörper*

t [mm]	b [mm]	Anzahl $l = 3,0$ m [-]	Anzahl $l = 3,5$ m [-]	Anzahl $l = 4,0$ m [-]	Volumen [m ³]
46	110	0	0	36	0,73
46	150	0	0	135	3,73
46	210	64	63	55	6,11
Gesamtvolumen [m³]					10,56


Abbildung 3-12: *Foto der sortierten Brettware als Grundmaterial für die Herstellung der BSH-Prüfkörper*

Verleimung und Abbund

Anschließend wurden die Prüfkörper in der Holzwerkstätte des Instituts für Holzbau und Holztechnologie händisch gefertigt. Im ersten Schritt wurden die angelieferten getrockneten Bretter auf die benötigte Trägerlänge gekappt. Folglich wurden die Bretter auf die benötigte Stärke gehobelt. Um möglichst wenig Bretter zu verbrauchen und keine angeschnittenen Randbretter zu bekommen, wurde die Stärke und Anzahl der Bretter auf die angestrebte Trägerhöhe abgestimmt. Für die geplanten Versuche wurden drei verschiedene Trägerhöhen benötigt, welche mit dem in Tabelle 3-7 angegebenen Schichtaufbau hergestellt werden sollten. Bei den breitesten Trägern mit der Höhe von $h = 288$ mm war aufgrund der großen Brett-Krümmung, die beim Trocknungsprozess infolge von Schwinden eingetreten ist, eine Brettstärke von $t = 41,1$ mm jedoch nicht herstellbar. Diese Träger wurden daher abweichend mit 8 Lagen von jeweils 36 mm Brettstärke ausgeführt. Die gehobelten Bretter wurden dann zu Stapeln für die jeweiligen Träger sortiert, wobei Bretter mit vielen Astlöchern, Kernanteil oder Weißfäule nach Möglichkeit ausgeschieden wurden, vgl. Abbildung 3-13.

Tabelle 3-7: *gewählter Schichtaufbau der BSH-Träger*

h [mm]	Anzahl Lagen [-]	t [mm]
192	5	38,4
288	7	41,1
384	10	38,4



Abbildung 3-13: Bilder von aussortierten Brettern: links Kernanteil mit vielen Astlöchern; rechts Weißfäule

Anschließend wurden die Prüfkörper händisch verleimt. Dafür wurde ein flüssiger Melaminharzkleber des Herstellers *dynea* [39] verwendet. Dieser Melaminharzkleber Prefere 4546 wurde mit dem Härter Prefere 5022 in einem Mischungsverhältnis Harz zu Härter von 100 : 30 vermischt und von Hand mit einer Walze aufgetragen. Die Auftragsmenge betrug dabei 400 g/m². Der abschließende Pressvorgang erfolgt mit einem Pressdruck von 0,8 N/mm² und einer Pressdauer von 7 Stunden in der Furnierpresse des Institutes für Holzbau und Holztechnologie, siehe Abbildung 3-14.

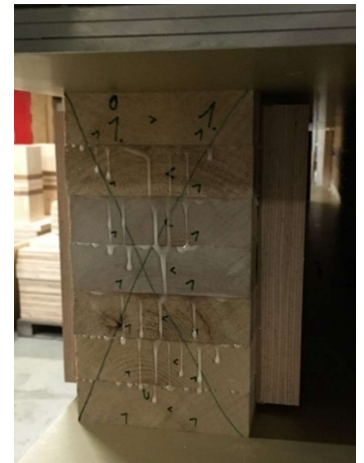


Abbildung 3-14: Träger in der Furnierpresse

Da im Universitätsinternen Labor eine Schlitz-Fräsung der Prüfkörper in den benötigten Dimensionen nicht durchführbar war, wurde diese Arbeit ausgelagert. In der Abbundhalle der Firma Lieb Bau Weiz in St. Ruprecht an der Raab, wurden die geleimten Träger mit einer Hundegger Abbundmaschine gefräßt, gebohrt und auf die endgültige Länge gekappt, siehe Abbildung 3-15.



Abbildung 3-15: Schlitzfräzung der Prüfkörper mit einer Abbundmaschine

3-2.2 STABDÜBEL

Es wurden handelsübliche galvanisch verzinkte Stabdübel mit der Stahlgüte S355 für die Versuche eingesetzt. Da die Stabdübel schon in einem relativ frühen Planungsstadium bezogen wurden und eine Überlänge keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat, wurden die Längen anhand der maximalen Trägerbreiten inklusive 10 mm Überstand je Seite berechnet. Eine Übersicht der bezogenen Stabdübel wird in Tabelle 3-8 aufgelistet. Aufgrund der eingesetzten Messtechnik (siehe Abschnitt 3-3.2.3) war ein maximaler Überstand von 7 mm je Seite einzuhalten, weshalb die Stabdübel vor den Versuchen händisch auf die jeweils benötigte Länge gebracht und abgegratet wurden.

Tabelle 3-8: Übersicht der bezogenen Stabdübel-Längen

Durchmesser	Länge	Anzahl
d [mm]	l [mm]	[-]
8	110	130
12	150	390
16	200	130



Abbildung 3-16: Bild eines abgelängten und abgegrateten Stabdübels

3-2.3 STAHLBLECHE UND VERSCHLEISSTEILE

3-2.3.1 Stahlbleche

Die Stahlblechgeometrie wurde in Anlehnung an die Prüfkfigurationen nach Gehri [3] gewählt, wonach die Stahlblechdicke so dünn wie möglich gehalten werden sollte. Daraus ergab sich eine Stärke von 8 mm für die Stahlbleche. Das Lochspiel zwischen Stahlblechbohrung und Stabdübel wurde mit 0,2 mm gewählt, was die in der Wirtschaft üblichen Toleranzen unterschreitet. Die Mindest-Randabstände der Bohrungen wurden mit $2,5 d$ gewählt, wobei als Durchmesser die größere Bohrung für das Verschleißteil herangezogen wird, siehe Abschnitt 3-2.3.2. Ein Überblick der verwendeten Stahlbleche ist in Abbildung 3-17 illustriert, die genauen Abmessungen sämtlicher Teile sind in den Plänen in Anhang 5-1.2B-3 zu entnehmen.



Abbildung 3-17: Überblick der verwendeten Stahlbleche

Vordimensionierung der Stahlbleche

Um bei der geplanten Prüfkfiguration ein Versagen der Stahlteile zu verhindern, wurde eine grobe Vordimensionierung mit der abgeschätzten maximalen Last durchgeführt. Die Nachweise wurden anhand des Skriptum Stahlbau Grundlagen der TU Graz [40] durchgeführt, wobei allerdings für alle Nachweise anstatt der Bemessungswerte die charakteristischen Werte für die Berechnung verwendet wurden, um eine realistischere Abschätzung zu bekommen. Die folgenden Stahleigenschaften wurden in der Berechnung angesetzt:

- | | |
|-----------------------------------------------|---------|
| • Stahlgüte für Stahlblech und Stabdübel | S355 |
| • Fließgrenze f_y [N/mm ²] | 355 |
| • Zugfestigkeit f_u [N/mm ²] | 490 |
| • Elastizitäts-Modul E [N/mm ²] | 210.000 |

- **Bestimmung der maximalen Kraft**

Für den Nachweis wurde die maximale Kraft mit dem Berechnungsansatz nach Gehri [3] ermittelt, wobei für alle drei variierten Nenndurchmesser jeweils beide Fälle für n betrachtet wurden. Daraus ergeben sich die in Tabelle 3-9 ersichtlichen Maximalkräfte.

Tabelle 3-9: geschätzte Kräfte für die Dimensionierung der Stahlteile nach der Formel von Gehri [3]

Formel:	$F = 0,18 \cdot d^2$		
Stabdübel-Durchmesser: [mm]	8	12	16
Kraft nach Gehri für $n = 1$ [kN]	11,5	25,9	46,1
Kraft nach Gehri für $n = 3$ [kN]	34,6	77,8	138,2

- Abscheren der Stabdübel**

Die Tragfähigkeit der Stabdübel auf Abscheren am Stahlblech kann wie folgt bestimmt werden:

$$F_{v,Rk} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A \cdot s \quad (1.27)$$

$$\text{Ausnutzungsgrad} = \frac{F_{\max}}{F_{v,Rk}} = \frac{0,18 \cdot d^2 [\cdot 1000]}{0,6 \cdot 490 \cdot \frac{d^2 \cdot \pi \cdot 2}{4}} = 39\% \quad (1.28)$$

- $F_{v,Rk}$ Grenzauskraft [N]
- α_v Faktor, $\alpha_v = 0,6$ wenn kein Gewinde in der Scherfuge liegt
- f_{ub} Zugfestigkeit des Stabdübels [N/mm²]
- A Querschnittsfläche des Stabdübels [mm²]
- s Anzahl der Scherfugen

Da der Stabdübel-Durchmesser in der Querschnittsfläche sowie auch in der Formel nach Gehri [3] zum Quadrat vorkommt, stehen alle Ergebnisse im gleichen Verhältnis. Bei einer Zugfestigkeit von 490 N/mm² haben die Stabdübel auf Abscheren eine Ausnutzung von 39 %. Berücksichtigt man, dass der Stabdübel tatsächlich etwas höhere Zugfestigkeiten aufweisen wird und die Zugfestigkeit im Nenner steht, wird der Ausnutzungsgrad noch geringer.

- Grenzlochleibung des eingeschlitzten Stahlblechs**

Mit diesem Nachweis wird überprüft, ob die einwirkende Kraft geringer als die maximal mögliche Grenzlochleibungskraft ist

$$F_{b,Rk} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t \quad (1.29)$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d} - 1,7 \\ 2,5 \end{array} \right\} \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{2,5 \cdot d}{d} - 1,7 = 5,3 \\ 2,5 \end{array} \right\} = 2,5 \quad (1.30)$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_1}{3 \cdot d} \\ \frac{f_{ub}}{f_u} \\ 1,0 \end{array} \right\} \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,5 \cdot d}{3 \cdot d} = 0,83 \\ \frac{490}{490} = 1,0 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 0,83 \quad (1.31)$$

- $F_{b,Rk}$ Grenzlochleibungskraft [N]
- f_u Zugfestigkeit des Stahlblechs [N/mm²]
- d Durchmesser des Stabdübels [mm]
- t Stahlblechdicke [mm]
- e_1 Randabstand in Krafrichtung [mm]
- e_2 Randabstand quer zur Kraft [mm]

Der Randabstand quer zur Krafrichtung ist bei allen Stahlblechen auf $2,5d$ gesetzt, somit ist k_1 für alle Berechnungen 2,5.

Der Randabstand in Krafrichtung ist bei allen Stahlblechen auf $2,5d$ gesetzt, somit ist α_b für alle Berechnungen 0,83.

Da in dieser Formel der Stabdübel-Durchmesser nur einfach vorkommt, in der Maximalkraft nach Gehri [3] allerdings zum Quadrat, wird der Fall mit dem größten Stabdübel-Durchmesser ausschlaggebend. Anstatt der Zugfestigkeit wird konservativ um auf der sicheren Seite zu sein die Fließgrenze angesetzt, die Ausnutzung ergibt sich zu 49 %.

$$\text{Ausnutzungsgrad} = \frac{F_{\max}}{F_{b,Rk}} = \frac{0,18 \cdot 16^2 \cdot [1000]}{2,5 \cdot 0,83 \cdot 355 \cdot 16 \cdot 8} = 49 \% \quad (1.32)$$

- **Grenzlochleibung des Verbindungs-Stahlblechs**

Die vorangehende Berechnung wird noch für den Anschluss des Stahlblechs an die Prüfmaschine durchgeführt (siehe die Pläne im Anhang 5-1.2B-3), unter der Annahme der folgenden Randbedingungen:

Stahlgüte für Stahlblech und Passbolzen:	S355
Fließgrenze f_y [N/mm ²]:	355
Zugfestigkeit f_u [N/mm ²]:	490
Randabstand in Krafrichtung [mm]:	$3d$
Bolzendurchmesser d [mm]:	30

Da der Randabstand in Krafrichtung $3d$ beträgt wird α_b zu 1,0. Die Maximalkraft wird für drei Stabdübel angesetzt, da dieser eine Bolzen die Belastung für alle drei tragen muss. Es wird wieder konservativ die Fließgrenze anstatt der Zugfestigkeit angesetzt.

$$\text{Ausnutzungsgrad} = \frac{F_{\max}}{F_{b,Rk}} = \frac{3 \cdot 0,18 \cdot 16^2 \cdot [1000]}{2,5 \cdot 1,0 \cdot 355 \cdot 30 \cdot 8} = 65 \% \quad (1.33)$$

- **Nachweis des Stahlblech-Netto-Querschnitts**

Dieser Nachweis wurde für alle verschiedenen Kombinationen geführt, hier ist nur der maßgebende Fall dargestellt, wobei alle Stahlbleche ähnlich geringe Ausnutzungsgrade aufweisen. Hier wird der Nachweis für drei Stabdübel mit dem Durchmesser von 16 mm geführt, die Querschnittsfläche ergibt sich aus der Länge des Stahlblechs abzüglich der drei Bohrungen für die Stabdübel (wobei hier die größere Bohrung für das Verschleißteil verwendet wird) mit der Stahlblechdicke multipliziert.

$$F_n = A_n \cdot f_y \quad (1.34)$$

$$\text{Ausnutzungsgrad} = \frac{F_{\max}}{F_n} = \frac{3 \cdot 0,18 \cdot 16^2 \cdot [1000]}{(374 - 3 \cdot 30) \cdot 8 \cdot 355} = 17 \% \quad (1.35)$$

3-2.3.2 Verschleißteile

Um eine plastische Deformation der Stahlbleche während der Versuche zu verhindern, wurden bei allen Prüfungen austauschbare, kreisrunde Verschleißteile (siehe Abbildung 3-19) mit derselben Stärke, gleichwertigen Stahleigenschaften und einem Innen- bzw. Außendurchmesser wie in Abbildung 3-18 skizziert eingesetzt.

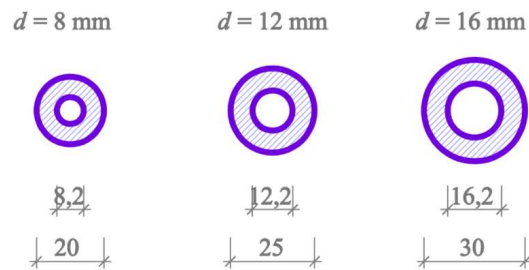


Abbildung 3-18: Skizze der Verschleißteile mit den dazugehörigen Abmessungen



Abbildung 3-19: Bild von Verschleißteilen für Stabdübel-Durchmesser von 16 mm

3-3 METHODEN

3-3.1 VORVERSUCHE - BESTIMMUNG DES FLIESSMOMENTS

Zur experimentellen Bestimmung des Fließmoments der Stabdübel mit $d = \{8, 16\}$ mm wurden jeweils 10 Versuche mit einem speziellen, am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz entwickelten Prüfaufbau (siehe Abbildung 3-20) durchgeführt. Die Stabdübel wurden dafür auf die notwendige Länge von 88 mm ($d = 8$ mm) bzw. 148 mm ($d = 16$ mm) abgelängt und in der in Abbildung 3-21 dargestellten Vorrichtung positioniert. Folglich wurden diese Stabdübel-Abschnitte mit der Hebelstange händisch bis zu einem Biegewinkel von 45° verformt.

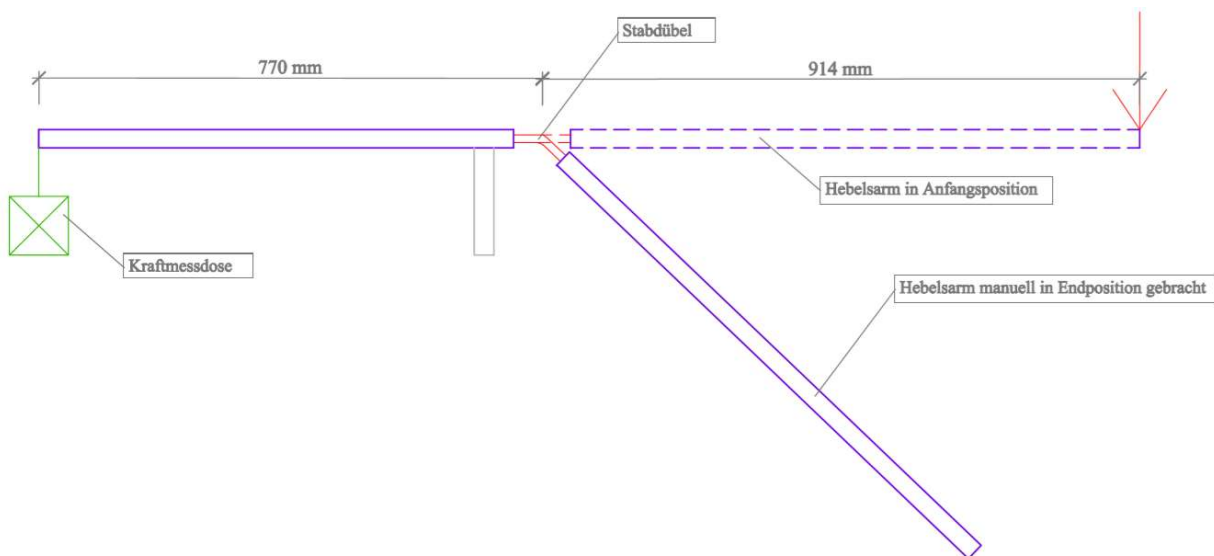


Abbildung 3-20: Skizze des Prüfaufbaus der TU Graz für die Ermittlung des Fließmoments



Abbildung 3-21: Prüfaufbau zur Bestimmung des Fließmoments M_y der Stabdübel

Die Auswertung der im Zuge der Versuchsdurchführung aufgezeichneten Daten (Biegemoment als Produkt einer gemessenen Reaktionskraft und eines konstanten Hebelarms z) erfolgte anschließend mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms gemäß ÖNORM EN 409 [37]. Der für die Bestimmung des Fließmoments anzuwendende Winkel α wird darin wie folgt bestimmt (siehe auch Abbildung 3-22):

$$\alpha = \alpha_1 \cdot \left(\frac{2,78 \cdot \rho_k}{f_t} \right)^{0,44} + \alpha_2 \quad (1.36)$$

- α für die Bestimmung des Fließmoments anzuwendender Winkel [°]
- α_1 Biegewinkel in Abhängigkeit des Stabdübel-Durchmessers [°]
- α_2 für Stabdübel mit 0° anzusetzen
- ρ_k charakteristische Rohdichte [kg/m³]
- f_t Zugfestigkeit des Verbindungsmittels [N/mm²]

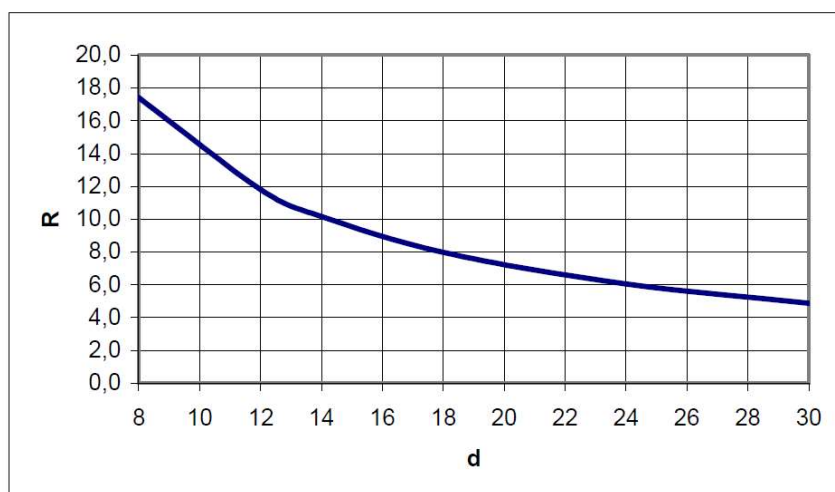


Abbildung 3-22: Diagramm zur Bestimmung von α_1 lt. ÖNORM EN409 [37]

- R Biegewinkel α_1 [°]
- d Durchmesser [mm]

Aus dem Diagramm in Abbildung 3-22 ergibt sich der Biegewinkel α_1 sowie daraus folgend mit einer angenommenen charakteristischen Rohdichte von 600 kg/m^3 und einer nominellen Zugfestigkeit von 490 N/mm^2 der Biegewinkel α wie in Tabelle 3-10 dargestellt.

Tabelle 3-10: Biegewinkel α_1 und α für die untersuchten Durchmesser

d [mm]	8	16
α_1 [°]	17,3	9,00
α [°]	29,7	15,4

3-3.2 HAUPTSERIE - PRÜFUNG DER STABDÜBELVERBINDUNGEN

3-3.2.1 Vorstellung und Diskussion der Prüfkongfiguration

Wie in Abschnitt 3-1.2 erläutert, wurde für die Bestimmung des Last-Verschiebungsverhaltens der querbeanspruchten Stabdübelverbindungen eine Push-Pull-Prüfkongfiguration verwendet. Eine detaillierte Darstellung dieser Konfiguration, welche am Auflagerträger der Universalprüfmaschine *lignum_uni_275* (Z-250 der Firma Zwick, Deutschland) montiert wurde, ist in Abbildung 3-23 bis Abbildung 3-25 ausgewiesen. Wie darin ersichtlich ist, erfolgte die Lagerung der BSH-Prüfkörper mittels Kontakt (Auflagerpressung) gegen zwei an der Oberkante der Prüfkörper-Enden situierten Widerlagerträger (Butterfly-C-Profile), welche wiederum durch je zwei M16-Gewindestangen der Güte 4.8 mit dem Auflagerträger verbunden waren. Zwischen der Oberkante des Auflagerträgers und der Unterkante der BSH-Prüfkörper wurde aufgrund der Platzierung der Wegmessenrichtung (siehe Abschnitt 3-3.2.3) ein freier Abstand belassen, welcher mittels Schwellenhölzer realisiert wurde. Der Anschluss des innenliegenden, eingeschlitzten Stahlblechs an die Lastaufnahme der Prüfmaschine erfolgte – neben der notwendigen Anpassung an den standardisierten Maschinenadapter – zur Gewährleistung einer momentenfreien Lasteinleitung als Gelenkkette, welche sich aus zwei Stahl-Stahl-Bolzenverbindungen und Anschluss- bzw. Futterblechen zusammensetzte.

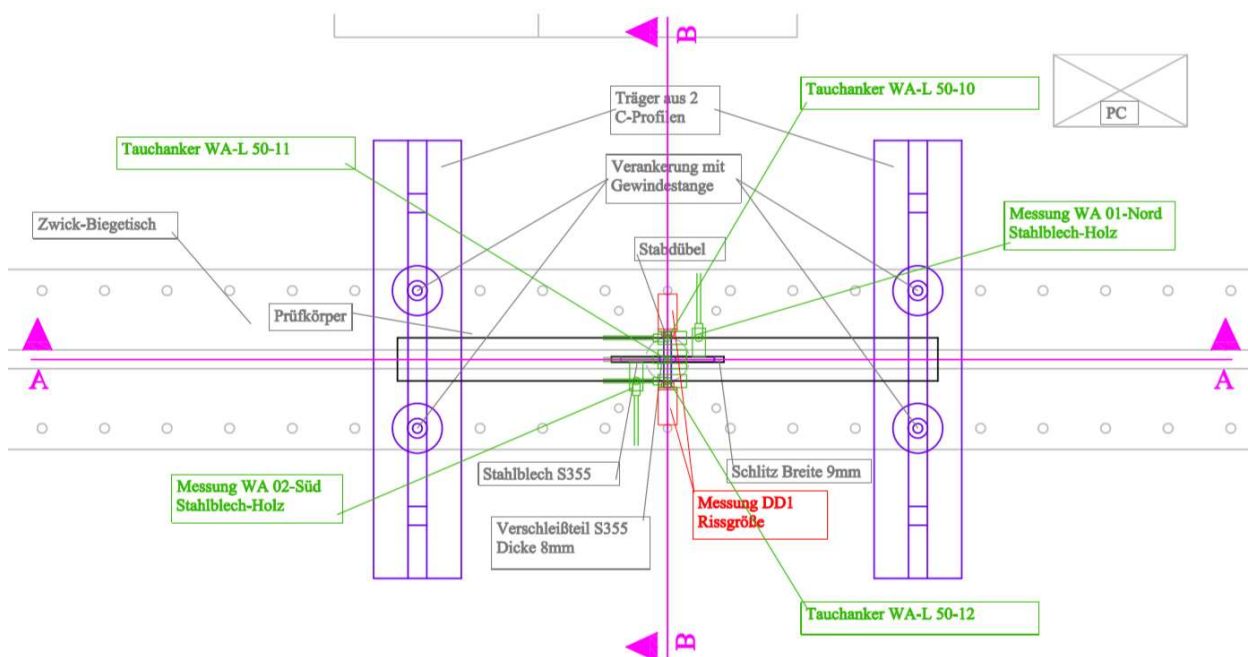


Abbildung 3-23: Grundriss der Prüfkongfiguration der Hauptversuche

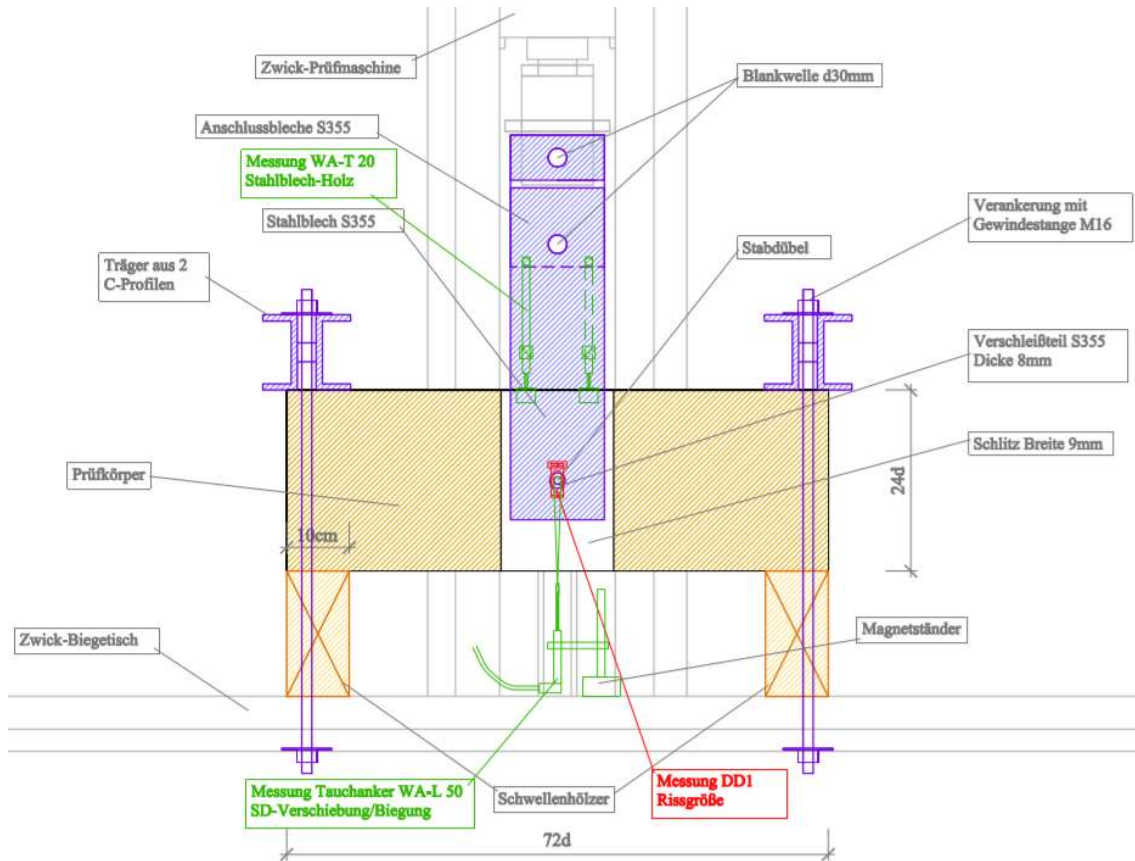


Abbildung 3-24: Schnitt A-A der Prüfkonfiguration der Hauptversuche

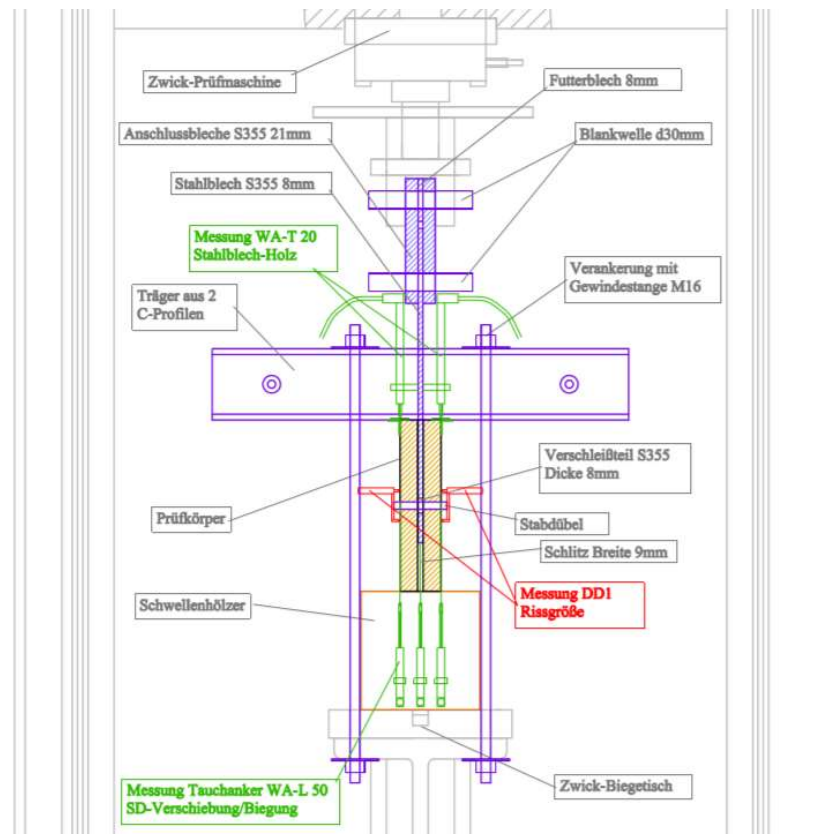


Abbildung 3-25: Schnitt B-B der Prüfkonfiguration der Hauptversuche

Abbildung 3-26 zeigt folglich zwei ausgesuchte Impressionen der Prüfkongfiguration für Stabdübelverbindungen mit $d = 12$ bzw. 16 mm.

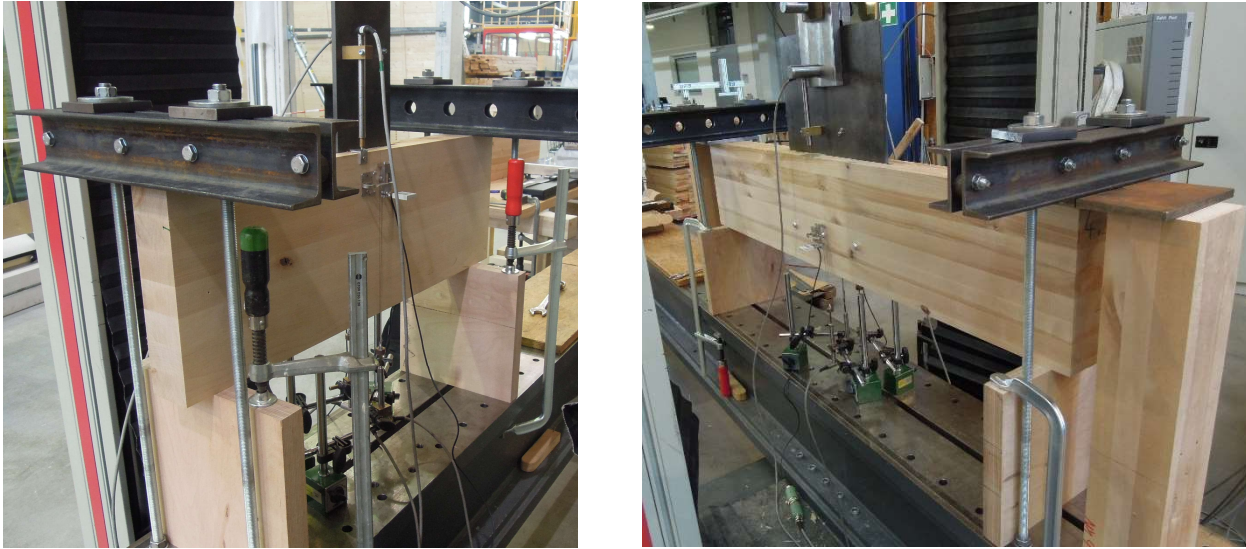


Abbildung 3-26: *Impressionen der Prüfkongfiguration; links: ein Stabdübel 12 mm, rechts: drei Stabdübel 16 mm*

Da die Lochabstände für die Verankerung der M16-Gewindestangen am Auflagerträger in einem Raster von 10 cm gesetzt sind, die Längen der Prüfkörper in Abhängigkeit von d bzw. a_1 jedoch im cm-Bereich variierten, war es für das Erreichen einer Auflagertiefe von mindestens 100 mm teilweise notwendig, Stahlbleche beizulegen. Um ein Kippen der Stahlträger bei ungünstiger Lage zu verhindern, wurden die Stahlbleche am freien Ende zudem unterstellt, siehe Abbildung 3-27.

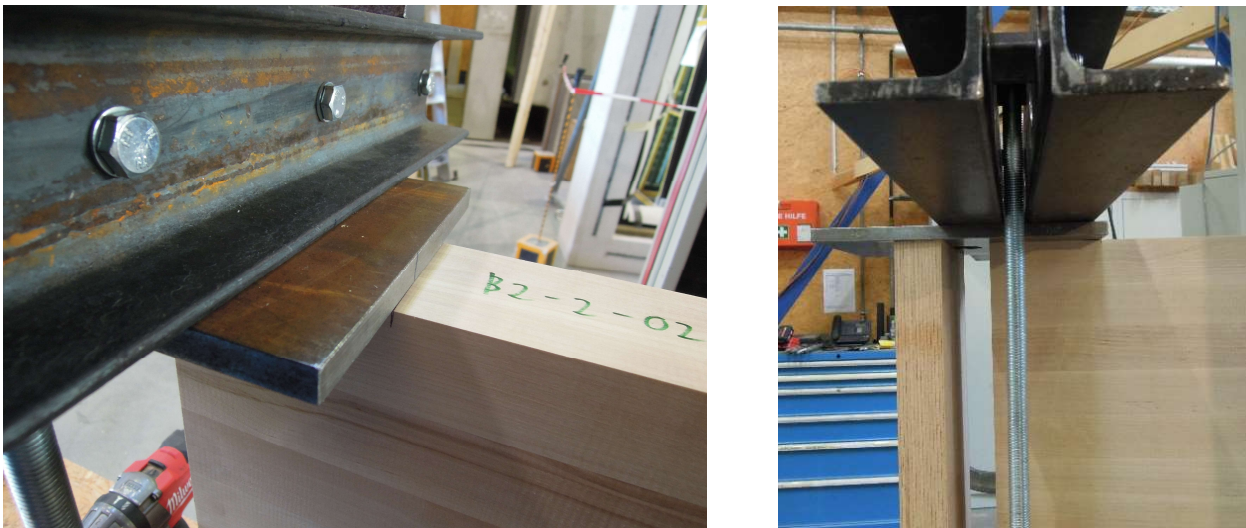


Abbildung 3-27: *Ausbildung der Widerlager bei ungünstigen Längenverhältnissen der Prüfkörper*

3-3.2.2 Dimensionierung der Widerlager

Nachweis des Stahlträgers

Aufgrund des Umstandes, dass es sich sowohl bei der Lagerung des Prüfkörpers als auch bei jener der Widerlagerträger um einen Einfeldträger handelte, kann angenommen werden, dass jede der vier M16-Gewindestangen mit einem Viertel der Prüfkraft beansprucht waren. Das maximale Moment in den Widerlagerträgern ergibt sich somit aus dem Produkt der Kraft in der Gewindestange mit der halben Spannweite der Träger:

$$M_{\max} = \frac{F_{\max}}{4} \cdot \frac{l}{2} = \frac{F_{\max} \cdot l}{8} = \frac{3 \cdot 0,18 \cdot 16^2 \cdot 220 \left[\cdot 1000^{-1} \right]}{8} = 3,80 \text{ kNm} \quad (1.37)$$

M_{\max} maximales Moment [kNm]
 l Spannweite des Trägers [mm]

Die Widerlagerträger bestanden aus zwei U-Profilen 80 / 45. Die Stahlgüte wurde mit S235 konservativ angenommen, das Widerstandsmoment W_y der beiden Profile ergibt sich nach den Bau-Tabellen von Krapfenbauer [41] zu 53,0 cm³.

$$\text{Ausnutzungsgrad} = \frac{\sigma_{m,y}}{f_{y,k}} = \frac{\frac{M_{\max}}{W_y}}{f_{y,k}} = \frac{\frac{3,80 \left[\cdot 100 \right]}{53,0}}{23,5} = 31\% \quad (1.38)$$

$\sigma_{m,y}$ maximale Biegespannung [kN/cm²]
 $f_{y,k}$ Fließgrenze des Stahls [kN/cm²]
 W_y Widerstandsmoment [cm³]

Nachweis der Gewindestange

Der Nachweis der Gewindestange wurde nach dem Skriptum Holzbau [33] geführt, dabei wurde die Festigkeitsklasse der Gewindestange konservativ mit 4.8 angenommen, daraus resultiert eine Zugfestigkeit von 400 N/mm², der Gewindestangenquerschnitt ergibt sich bei einem Nenn-Durchmesser von 16 mm zu 157 mm².

$$F_{\text{gew,max}} = \frac{0,9 \cdot f_{u,k} \cdot A_s}{\gamma_{M,\text{Stahl}}} = \frac{0,9 \cdot 400 \cdot 157 \left[\cdot 1000^{-1} \right]}{1,25} = 45,2 \text{ kN} \quad (1.39)$$

$F_{\text{gew,max}}$ maximal aufnehmbare Kraft des Gewindes [kN]
 $f_{u,k}$ Zugfestigkeit des Gewindes [N/mm²]
 A_s Stahlquerschnitt des Gewindes [mm]
 $\gamma_{M,\text{Stahl}}$ Teilsicherheitsbeiwert für Stahl

Die Beanspruchung je Gewindestange ergibt sich als einem Viertel der maximalen Prüfkraft, welche bei $n = 3$ Stabdübel mit $d = 16$ mm 45,2 kN beträgt.

$$\text{Ausnutzungsgrad} = \frac{F_{\text{gew}}}{F_{\text{gew,max}}} = \frac{34,56}{45,2} = 76\% \quad (1.40)$$

Nachweis der Auflagerpressung am Widerlager

Um ein Einpressen der Auflagerplatten in den Prüfkörper zu verhindern, wurde vorab die Auflagerpressung in Form eines Querdrucknachweises gem. Eurocode 5 der ÖNORM B 1995-1-1:2019 [1] überprüft. Unter Zugrundlegung einer gewählten Auflagerlänge von 100 mm und einer minimalen Auflagerbreite, welche sich aus der minimalen Seitenholzschlankheit ergibt, sowie der maximal möglichen Prüfkraft F_{\max} war hierfür der Fall mit $n = 3$ Stabdübel $d = 16$ mm maßgebend. Der $k_{c,90}$ -Beiwert ergibt sich für BSH mit einseitigem Vorholz zu 1,5, der Festigkeitswert $f_{c,90,k}$ wurde anhand der Werte nach Kovryga et al. [42] mit 6,6 N/mm² gewählt. Die maximale Kraft je Auflager ist die Hälfte der gesamten Maximalkraft:

$$\sigma_{c,90,\text{vorh}} = \frac{F_{\max}}{2 \cdot A} = \frac{3 \cdot 0,18 \cdot 16^2 \cdot \left[1000 \right]}{2 \cdot (100 \cdot (2 \cdot 2,5 \cdot 16 + 9))} = 7,77 \text{ N/mm}^2 \quad (1.41)$$

$$\sigma_{c,90,\text{zul.}} = k_{c,90} \cdot f_{c,90,k} = 1,5 \cdot 6,6 = 9,9 \text{ N/mm}^2 \quad (1.42)$$

$\sigma_{c,90,vorh}$	vorhandene Druckspannung [N/mm ²]
$\sigma_{c,90,zul}$	zulässige Druckspannung [N/mm ²]
F_{max}	maximale Druckkraft je Auflager [mm ²]
A	Auflagerfläche [mm ²]
$k_{c,90}$	Beiwert
$f_{c,90,k}$	charakteristischer Wert der druckfestigkeit quer zur Faser [N/mm ²]

Für diese Annahmen ergibt sich ein Ausnutzungsgrad von 78 %.

3-3.2.3 Verwendete Messtechnik

Um bei der Prüfung möglichst viele Daten zur genauen Ermittlung der Anrisslast im Zuge der Querbeanspruchung zu erfassen, wurden mehrere verschiedene Messaufnehmer eingesetzt. Die Auswahl der Messgeräte hing vom Prüfaufbau und den erwarteten Verformungen des Prüfkörpers ab.

Wegaufnehmer

Um die Verformungen des Stabdübels sowie den relativen Weg zwischen Stahlblech und Holz zu ermitteln, wurden induktive Standard-Wegaufnehmer der Firma HBM verwendet. Dabei kamen zwei verschiedene Typen zum Einsatz. Am Stahlblech wurden oberhalb des Prüfkörpers zwei Wegtaster WA-20 mit einer Halterung montiert, wobei die Montage jeweils 5 cm von der Stabdübel-Achse in Trägerlängsrichtung entfernt erfolgte. Diese Wegaufnehmer erfassten den Weg zwischen dem freien Stahlblechbereich und der Oberkante des Prüfkörpers.

Unter dem Prüfkörper wurden drei Tauchanker des Typs WA-50 mithilfe von Magnetständern in die richtige Position gebracht. Der mittige Tauchanker wurde dabei mit einer Langmutter an einem auf der unteren Stahlblechkante angeschweißtem Gewindebolzen befestigt. (Eine Befestigung in der Mitte direkt am Stabdübel, im Zwischenraum zwischen Stahlblech und Holz konnte aufgrund der beengten Platzverhältnisse nicht wie gewünscht erfolgen, die Montage erfolgte daher am Stahlblech.) Dieser nahm die zentrische Verschiebung des Stabdübels auf. Die beiden äußeren Tauchanker wurden mit einem dehnstarken Seil über Schlaufen an den beiden Stabdübelenden außerhalb des Prüfkörpers angebracht und nahmen die entsprechende, äußere vertikale Stabdübel-Verschiebung auf.

Dehnungsaufnehmer

Um im Nahbereich des Stabdübels eine Dehnungszunahme aufgrund des Anreißen des Holzes zu bestimmen, wurden zusätzlich an beiden Seiten des Stabdübels DD1 Dehnungsaufnehmer der Firma HBM montiert. Diese wurden mit dafür vorgesehenen Montageklammern an ihre Position geklemmt. Aufgrund der Position direkt über dem Stabdübel durfte der maximale Überstand des Stabdübels nur ca. 7 mm betragen.

Eine Illustration der eingesetzten Messtechnik ist in der folgenden Abbildung 3-28 enthalten.

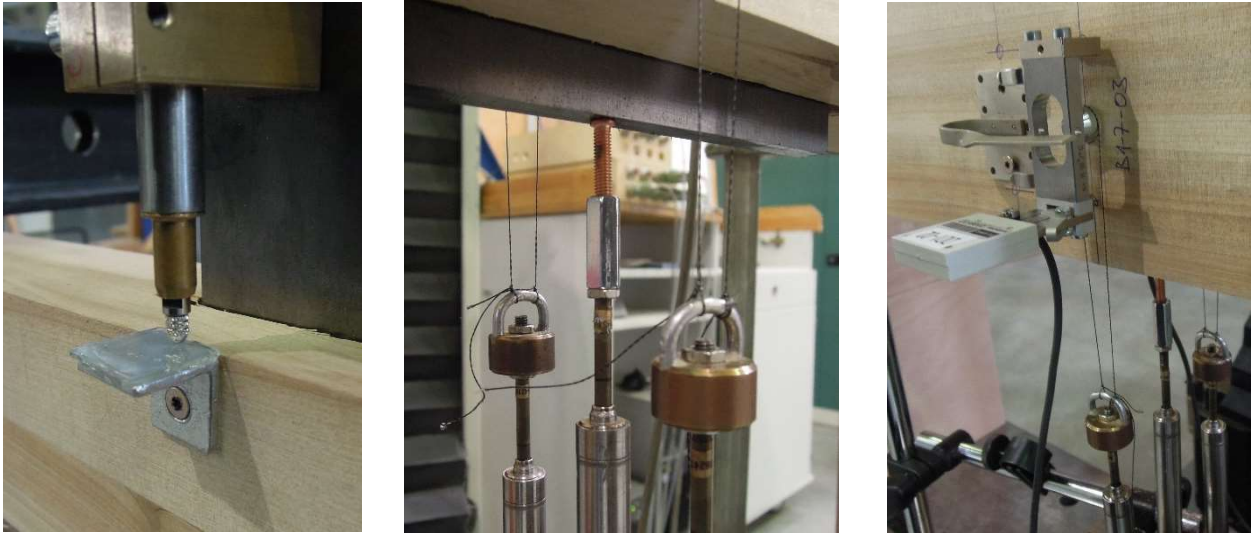


Abbildung 3-28: *Detailbilder der verwendeten Messtechnik; links: Montage der Wegaufnehmer oben, Mitte: Anschluss der Tauchanker unter dem Prüfkörper, rechts: Montage des Dehnungsmessers*

Abschließend ist anzumerken, dass bei den Versuchen mit $n = 3$ Stabdübeln die Messinstrumente nur auf dem mittleren Stabdübel montiert waren.

3-3.2.4 Abschätzung des Versagensmodus

Nachfolgend wird die Standard-Versuchskonfiguration ($n = 1, d = 12 \text{ mm}, a_{4,t} = 12d$) in Anlehnung an den Eurocode 5 der ÖNORM B 1995-1-1:2019 [1] durchgerechnet, es werden jedoch anstatt der Design-Werte Mittelwerte verwendet, um eine möglichst realitätsnahe Abschätzung der Versuchsreihe zu bekommen. Die Berechnung erfolgt dabei für eine Schlankheit von 2,5 und 5,0. Daraus ergibt sich die Seitenholzstärke $t_1 = 30 \text{ mm} (= 2,5d)$ für eine Schlankheit von 2,5 und $t_1 = 60 \text{ mm} (= 5,0d)$ für eine Schlankheit von 5,0.

Folgende Kenngrößen werden angenommen:

- Rohdichte ρ_{mean} : 600 kg/m³
- Lochleibungsfestigkeit $f_{h,0,\text{mean}}$: 34,44 N/mm² (aus Versuchen von Hohenwarter [9])
- Fließmoment $M_{y,\text{mean}}$: 191.306 Nmm (aus den Vorversuchen, vgl. Kapitel 4-1)

$$f_{h,\alpha,\text{mean}} = \frac{f_{h,0,\text{mean}}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (1.43)$$

$$f_{h,90,\text{mean}} = \frac{34,44}{1,08 \cdot \sin^2(90) + \cos^2(90)} = 32,37 \text{ N/mm}^2$$

$$k_{90} = 0,90 + 0,015 d \quad (1.44)$$

$$k_{90} = 0,90 + 0,015 \cdot 12 = 1,08$$

$$R_{SD} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,90,\text{mean}} \cdot t_1 \cdot d \\ f_{h,90,\text{mean}} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,\text{mean}}}{f_{h,90,\text{mean}} \cdot t_1^2 \cdot d}} - 1 \right] \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,\text{mean}} \cdot f_{h,90,\text{mean}} \cdot d} \end{array} \right\} \quad (1.45)$$

$$R_{SD} = \min \left\{ \begin{array}{l} 32,37 \cdot 30 \cdot 12 = 11.653 \text{ N} \\ 32,37 \cdot 30 \cdot 12 \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot 191.306}{32,37 \cdot 30^2 \cdot 12}} - 1 \right] = 12.197 \text{ N} \\ 2,3 \cdot \sqrt{191.306 \cdot 32,37 \cdot 12} = 19.827 \text{ N} \end{array} \right\} = 11.653 \text{ N}$$

$$R_{\text{ges}} = R_{SD} \cdot s \cdot m \cdot n_{\text{ef}} \quad (1.46)$$

$$R_{\text{ges}} = 11.653 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 = 23.306 \text{ N}$$

Für eine Schlankheit von 2,5 wird Versagensmodus 1 maßgebend, der Stabdübel bildet kein Fließmoment.

$$R_{SD} = \min \left\{ \begin{array}{l} 32,37 \cdot 60 \cdot 12 = 23.307 \text{ N} \\ 32,37 \cdot 60 \cdot 12 \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot 191.306}{32,37 \cdot 60^2 \cdot 12}} - 1 \right] = 13.891 \text{ N} \\ 2,3 \cdot \sqrt{191.306 \cdot 32,37 \cdot 12} = 19.827 \text{ N} \end{array} \right\} = 13.891 \text{ N} \quad (1.47)$$

$$R_{\text{ges}} = R_{SD} \cdot s \cdot m \cdot n_{\text{ef}} \quad (1.48)$$

$$R_{\text{ges}} = 13.891 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 = 27.782 \text{ N}$$

Für eine Schlankheit von 5,0 wird Versagensmodus 2 maßgebend, der Stabdübel bildet ein Fließmoment.

3-3.2.5 Prüfdurchführung

Nachfolgend wird die prinzipielle Durchführung der Versuche erläutert, welche je nach Serie geringfügig abweichen konnte.

Allgemeines

Vor Beginn einer neuen Serie wurden die Stahlbleche getauscht und die Wegaufnehmer an zu verwendenden Stahlblech montiert. Die Auflagerhölzer wurden auf die Länge der Prüfkörper eingerichtet. Nach einer Erfassung der Masse und der Abmessungen des Prüfkörpers wurden die Verschleißteile im Stahlblech platziert, der Prüfkörper in Position gebracht und mit Hilfe der Widerlagerträger am Auflagerträger der Prüfmaschine fixiert. Dann wurde das Stahlblech vorsichtig in den Schlitz niedergefahren und in die endgültige Position gebracht. Anschließend wurde der Stabdübel unter ständiger Kontrolle der Kraftanzeige der Prüfmaschine eingeschlagen, wobei die Position der Maschine dabei immer so gestellt wurde, dass keine Kraft in der Verbindung vorhanden war. Folglich wurden die Seil-Schlaufen der Tauchanker über die Enden der Stabdübel angebracht beziehungsweise das Gewinde des Tauchankers mit einer Langmutter an das Stahlblech-Gewinde angeschlossen. Zuletzt wurden noch die Dehnungsmesser mit der Montagehalterung über den Stabdübel gespannt und entriegelt. Nach einer abschließenden Kontrolle und Nullsetzung der Prüfkraft wurde die Prüfung gestartet. Die monotone Lastaufbringung erfolgte dabei weggesteuert, wobei die Prüfgeschwindigkeit von Serie zu Serie variierte, sodass ein Versagen innerhalb von 300 ± 120 s eintrat.

Protokollierung der Prüfungen

Im Prüfprotokoll wurden die Abmessungen sowie die Masse der Prüfkörper vor der Prüfung eingetragen, die Prüfgeschwindigkeit, der Versagensmodus sowie sonstige besondere Vorkommnisse wurden ebenfalls schriftlich aufgezeichnet. Von der verwendeten Messwertaufzeichnung wurden die Kraft, der Weg, die Zeit sowie die Messungen der zwei Wegaufnehmer, drei Tauchanker und zwei Dehnungsmesser elektronisch aufgenommen und gespeichert. Mit einer Digitalkamera wurden die Prüfkörper vor und nach der Durchführung der Prüfung fotografiert. Dabei wurden die Lagerung, Montage der Messgeräte, etwaige Schäden und Fehlstellen sowie die Anrisse nach der Prüfung bildlich festgehalten.

Rissbilder und Versagensart

Prinzipiell kann man die Rissbilder unter zwei Betrachtungsweisen analysieren. Die lokale Betrachtung beinhaltet die direkte Umgebung des Stabdübels, die globale Betrachtung umfasst den ganzen Prüfkörper. Bei der lokalen Betrachtung kann man die Auswirkung der verschiedenen Stabdübel-Schlankheiten erkennen. Bei einer Seitenholzschlankheit von 2,5 blieb der Stabdübel unverformt, erfuhr im Gesamten eine Verschiebung nach oben und wurde gleichmäßig in das Holz gedrückt (siehe Abbildung 3-29 links und rechts). Bei einer Seitenholzschlankheit von 5 hingegen war außen nur eine geringe Aufweitung des Bohrloches erkennbar, der Grund dafür ist die Entstehung des Fließgelenks, der Stabdübel wurde innen an der Oberseite gegen das Bohrloch gedrückt, an der Außenseite hingegen wurde die Unterseite des Bohrloches belastet (siehe Abbildung 3-29 Mitte).



Abbildung 3-29: *verschiedene Arten der Lochleibungspressung, links bei einer Schlankheit von 2,5; Mitte bei einer Schlankheit von 5,0; rechts für einen Durchmesser von 16 mm bei einer Schlankheit von 2,5*

Die globale Betrachtung stellt einen Zusammenhang zwischen dem Abstand zum belasteten Rand und der Rissgröße dar (siehe Abbildung 3-30). Je größer der Abstand zum belasteten Rand, desto kleiner war der Riss, was auf mögliche Umlagerungen und eine bessere Überdrückung bei mehr Vorholz zurückgeführt werden kann. Bei den Rissbildern ist erkennbar, dass bei einem Stabdübel und einem geringen Abstand zum belasteten Rand der Riss sich über einen Großteil der Prüfkörper-Länge ausbreitet, wohingegen bei großem Abstand zum belasteten Rand nur eine geringe Ausbreitung des Risses stattfindet. In Abbildung 3-30 sind diese Rissausbreitungen dargestellt, links breitet sich der Riss über einen Großteil der Prüfkörper-Länge aus, in der Mitte ist er im mittleren Bereich des Prüfkörpers und rechts nur lokal erkennbar. Die oben genannten Merkmale treten unabhängig vom Stabdübel-Durchmesser auf, zur besseren Betrachtung wurden deshalb Bilder von verschiedenen Stabdübel-Durchmessern genommen.

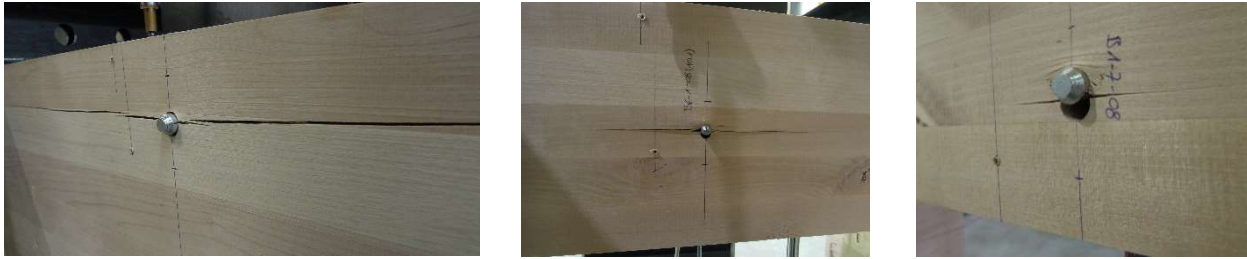


Abbildung 3-30: *Rissgrößen bei verschiedenen Abständen zum belasteten Rand, links bei Lage oben; Mitte bei Lage mittig, rechts bei Lage unten*

Bei den Versuchen mit drei Stabdübel breitete sich der Riss fast immer über die gesamte Prüfkörper-Länge aus, das Aufreißen geschah dabei unter einem lauten Geräusch (siehe Abbildung 3-31).



Abbildung 3-31: *Durchriss bei einem Prüfkörper mit drei Stabdübel, links: Riss über die gesamte Länge, rechts: Rissverlauf im Querschnitt*

Die Stabdübel wiesen bei der Entnahme meist eine plastische Deformation auf, was jedoch nicht bedeutet, dass beim Anriss schon eine solche im Stabdübel vorhanden war, dass alle Versuche bis zum Versagen der Verbindung gefahren wurden. Bei den Verbindungen mit drei Stabdübel hat die Verbindung bereits vor Erreichen einer plastischen Verformung der Stabdübel versagt. Dabei wiesen Verschleißteile nur geringe Deformationen auf, an den Stabdübeln ist ebenfalls eine Eindrückung der Verschleißteile ersichtlic.



Abbildung 3-32: *geprüfte Stabdübel, rechts: deformierter Stabdübel mit zugehörigem Verschleißteil, rechts: Versuch mit drei Stabdübel – nur sehr geringe Deformation erkennbar*

Diese Riss-Analysen sollen dem besseren Verständnis der Vorgänge im Prüfkörper sowie dem Verhalten der Verbindung während der Prüfung dienen, geben jedoch keine genaueren Rückschlüsse auf die Anrisslast, da die letztlich sichtbaren Risse beim Versagen der Verbindung (Erreichen der Maximalkraft) auftraten.

Schäden

Bei der Durchführung der Prüfungen sind auch vereinzelt Schäden aufgetreten. Aufgrund von Passungenauigkeiten bei den Bohrungen für drei Stabdübel kam es des Öfteren zu leichten Abplatzungen im Bereich des Bohrloches (siehe Abbildung 3-33 links). Die Schlitz für das Stahlblech waren nicht immer korrekt ausgeführt, beim Einführen des Stahlblechs in den Schlitz entstanden dadurch Widerstände, wodurch sich eine in den Messdaten ersichtliche Gleitreibung einstellte (siehe Abbildung 3-33 rechts).

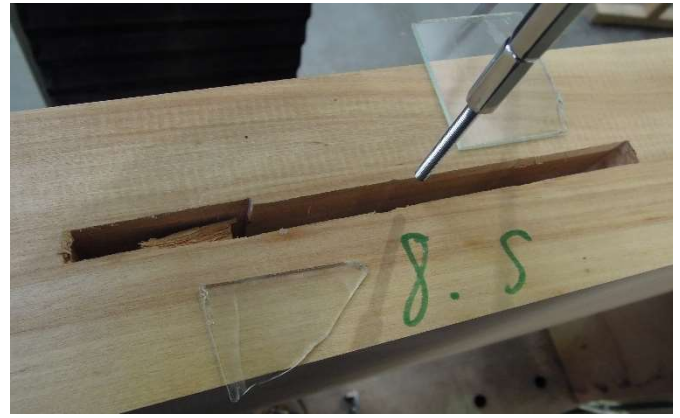
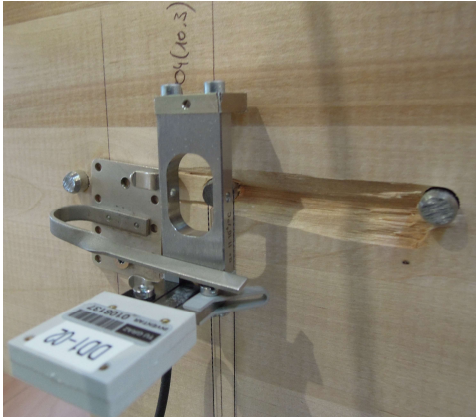


Abbildung 3-33: Schäden an den Prüfkörpern; links: Abplatzung zwischen den Bohrungen, rechts: schief gefräster Schlitz

Ein Prüfkörper versagte plötzlich bei einer Fehlstelle im Bereich eines verwachsenen Astes. Der Prüfkörper knickte in diesem Bereich auf, die unter dem Wegaufnehmer platzierte Plexiglas-Platte zerbrach dabei (siehe Abbildung 3-34 links). Der Prüfkörper B4-6-05 wies ferner ein auffälliges Rissbild im Querschnitt auf, eine Hälfte des Prüfkörpers riss dabei um fast eine Brettlamelle versetzt zur anderen Hälfte durch (siehe Abbildung 3-34 Mitte). Bei den Versuchen mit drei Stabdübel kam es zum Teil zu leichten Eindrückungen im Auflager-Bereich, wie in Abbildung 3-34 rechts erkennbar ist.



Abbildung 3-34: Schäden an den Prüfkörpern; links: Fehlstelle bei einem Ast, Mitte: Rissverlauf im Querschnitt, rechts: Auflagerpressung

Während der Durchführung der Prüfung des Prüfkörpers B4-2-02 kam es zu einem Software-Fehler der Prüfmaschine, was zur Folge hatte dass die Maschine während der Belastung stoppte und die Messdaten dieses Prüfkörpers verloren gingen.

3-3.2.6 Nachbereitung

Bestimmung der Holzfeuchte

Holz ist ein kapillar-poröses Material mit einem Porenanteil von ca. 50 ÷ 60 %. In den Poren der Holzstruktur befindet sich im natürlich vorkommenden Zustand immer Wasser. Je nachdem wie die äußeren Feuchtebedingungen sind, wird, über einen längeren Zeitraum betrachtet, Wasser abgegeben oder aufgenommen, das Holz wirkt somit Feuchte-regulierend. Die Holzfeuchte gibt das Verhältnis aus der Masse des im Holz befindlichen Wasser zur Masse des trockenen Holzes in Prozent an. [43]

Zur Bestimmung der Holzfeuchte gibt es mehrere verschiedene Verfahren. Die im Rahmen der Versuchsreihen gemessenen Holzfeuchten wurden mit der Darr-Methode bestimmt. Dabei wird ein Probestück aus dem Holz geschnitten, abgewogen und in einen Trockenschrank gegeben bis das gesamte Wasser ausdiffundiert ist. Anschließend wird das Holzstück nochmals gewogen und die Masse des Holzes vor und nach der Trocknung errechnet. Die Trocknung und Berechnung der Holzfeuchte wird in dieser Arbeit nach der ÖNORM EN 13183-1:2004 [44] durchgeführt.

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (1.49)$$

- u Feuchtegehalt [%]
 m_1 Masse der Probe vor dem Trocknen [g]
 m_0 Masse der Probe nach dem Trocknen [g]

Bestimmung der Rohdichte

Zunächst wird der Begriff der Dichte definiert, das ist im Allgemeinen das Verhältnis von Masse zu Volumen.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1.50)$$

- ρ Dichte [kg/m³]
 m Masse [kg]
 v Volumen [m³]

Je nach Feuchtegehalt des Holzes können das Volumen und die Masse variieren, daher muss die Rohdichte noch präziser in Bezug auf den vorherrschenden Feuchtegehalt formuliert werden. Dafür werden verschiedene Indizes verwendet. Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse der Rohdichte beziehen sich dabei auf eine Referenzholzfeuchte von 12 %. Die entsprechende Umrechnung der Rohdichte mit der Holzfeuchte u zur Rohdichte bei 12 % Holzfeuchte geschah anhand der ÖNORM EN 384 [45] mit nachfolgender Formel:

$$\rho_{12} = \rho_u \cdot (1 - 0,005 \cdot (u - u_{12})) \quad (1.51)$$

- ρ_{12} Rohdichte bezogen auf die Bezugsholzfeuchte [kg/m³]
 ρ_u Rohdichte bei vorhandener Holzfeuchte [kg/m³]
 u vorhandene Holzfeuchte [%]
 u_{12} Holzfeuchte von 12% [%]

Die Ermittlung der Rohdichte erfolgte mit Holzproben mit den Dimensionen von ca. 80 mm x 80 mm x 30 mm (B x H x T), die in der Nähe des Stabdübels aus der Lamelle des Bohrloches entnommen wurden.

Ermittlung der Anrisslast

Das Hauptaugenmerk in dieser Arbeit lag auf der korrekten Erfassung der Anrisslast. Um die Ergebnisse richtig interpretieren zu können, soll im Folgenden die Ermittlung der Anrisslast genauer erläutert werden. Nach der Prüfung sämtlicher Prüfkörper wurden die aufgezeichneten Daten in ein Auswerte-File eines Tabellenkalkulationsprogramms eingelesen und die gewünschten Parameter analysiert. Um die Anrisslast möglichst genau bestimmen zu können, wurden dabei mehrere Parameter untersucht (Änderung der Kraft ΔF , Änderung der Verformung Δw). Wiesen alle untersuchten Parameter an der gleichen Stelle (gleiche Zeilennummer im Auswertefile) ein deutliches Indiz für einen Anriss auf, konnte dieser als ziemlich sicher angesehen werden. Häufig kam es jedoch vor, dass nicht alle Parameter an der gleichen Stelle Anzeichen für den ersten Anriss aufwiesen. In diesem Fall wurde individuell abgewogen und meist der geringste Wert für die Definition der Anrisslast ausgewählt. Bei allen Serien mit der größeren Seitenholzsclankheit von $\lambda = 5$ gestaltete sich die Bestimmung der Anrisslast als schwierig. Der Anriss entsteht grundsätzlich im Inneren des Prüfkörpers, durch das stärkere Seitenholz war eine Lokalisierung mit den Dehnungsmessern schwer möglich. Des Weiteren konnte im Kraftverlauf aufgrund einer möglichen Fließgelenk-Bildung des Stabdübels während des Anrisses nicht immer ein eindeutiger Punkt festgehalten werden. Wenn sich im Stabdübel ein Fließgelenk bildete und der Stabdübel sich dadurch verbog, musste der erste Anriss bereits erfolgt sein. Diese Verbiegung des Stabdübels war mithilfe der drei von unten messenden Tauchanker WA-50 gut nachvollziehbar, jedoch konnte in den Diagrammen aufgrund der sukzessive entstehenden Verformung keine exakte Stelle definiert werden.

Nachfolgend soll die Ermittlung des ersten Anrisses anhand des Prüfkörpers B1-4-02 nachvollziehbar dargestellt werden. Die Abszissenwerte in den Diagrammen bezogen sich meist auf die Zeilennummer, da diese in den Auswertedateien einfach zu handhaben war.

Änderung der Kraft ΔF

Einerseits sollte beim ersten Anriss ein Kraftabfall oder ein deutlicher Rückgang der Kraftzunahme ersichtlich sein, daher wird die Änderung der Kraft ΔF als ein erster Indikator herangezogen. Diese errechnet sich wie folgt:

$$\Delta F_i = F_i - F_{i-1} \quad (1.52)$$

- ΔF_i Änderung der Kraft an der Stelle i
- F_i Kraft an der Stelle i
- F_{i-1} Kraft an der Stelle $i-1$

Wenn ΔF negativ ist, findet eine Kraftabnahme statt; häufig war der erste Anriss allerdings nicht bei der ersten Kraftabnahme, sondern schon etwas früher bei einem plötzlichen Abfall der Kraftzunahme zu bemerken. Im Falle des Prüfkörpers B1-4-02 ist der erste Anriss, wie in Abbildung 3-35 ersichtlich ist, ungefähr bei der Zeile 320 bemerkbar, wobei diese keinen Kraftabfall, sondern lediglich einen plötzlichen Abfall der Kraftzunahme darstellt. Da die Größe der Kraftabnahme je nach Prüfserie und auch Prüfkörper sehr großen Schwankungen unterlag, wurden alle Versuche individuell betrachtet und der erste visuell bemerkbare Abfall der Kraftzunahme ausgewählt. Dies bedeutet natürlich, dass eine subjektive Bewertung stattgefunden hat, jedoch konnte der erste Anriss nicht aussagekräftig mit einer bestimmten vordefinierten Kraftabfall-Größe identifiziert werden.

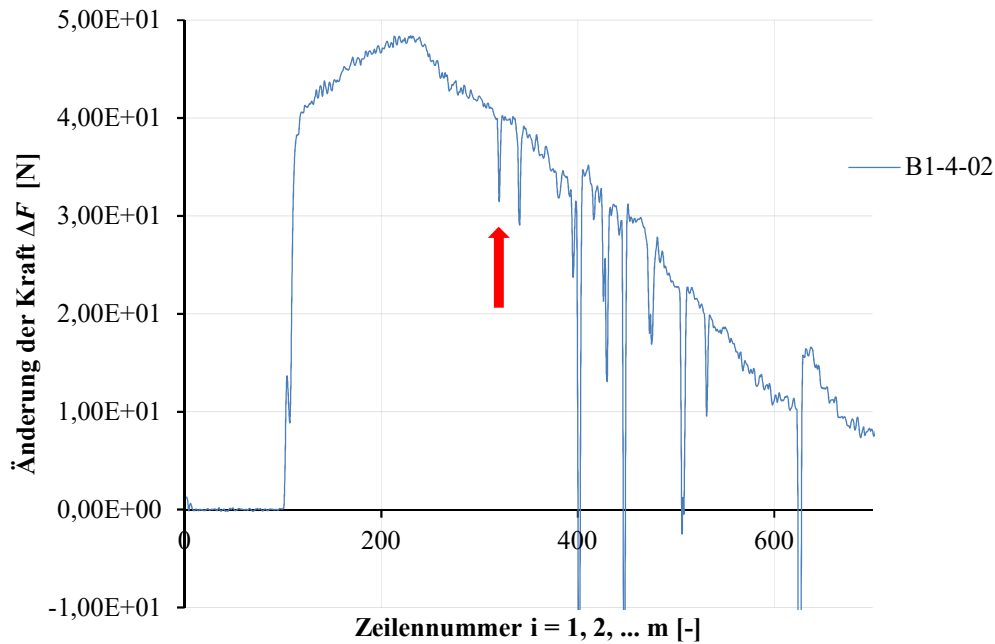


Abbildung 3-35: Änderung der Kraft ΔF über die Zeilennummer für die Probe B1-4-02

Änderung der Verformung Δw

Bei den Daten der Dehnungsmesser DD1 sollte an der Stelle des plötzlichen Abfalles der Kraftzunahme ein plötzlicher Anstieg der Verformung bemerkbar sein. Um dies zu identifizieren, wurde zusätzlich die Änderung der Verformung Δw als zweiter Indikator verwendet.

$$\Delta w_i = w_i - w_{i-1} \quad (1.53)$$

- Δw_i Änderung der Verformung an der Stelle i
- w_i Verformung an der Stelle i
- w_{i-1} Verformung an der Stelle $i-1$

Auch für die Verformung ist in Abbildung 3-36 eindeutig im Bereich der Zeile 320 der erste Ausschlag und damit eine plötzliche Zunahme zu bemerken. Wie bei der Änderung der Kraft konnte auch die Änderung der Verformung nur manuell und damit subjektiv in Bezug zum ersten Anriss gesetzt werden.

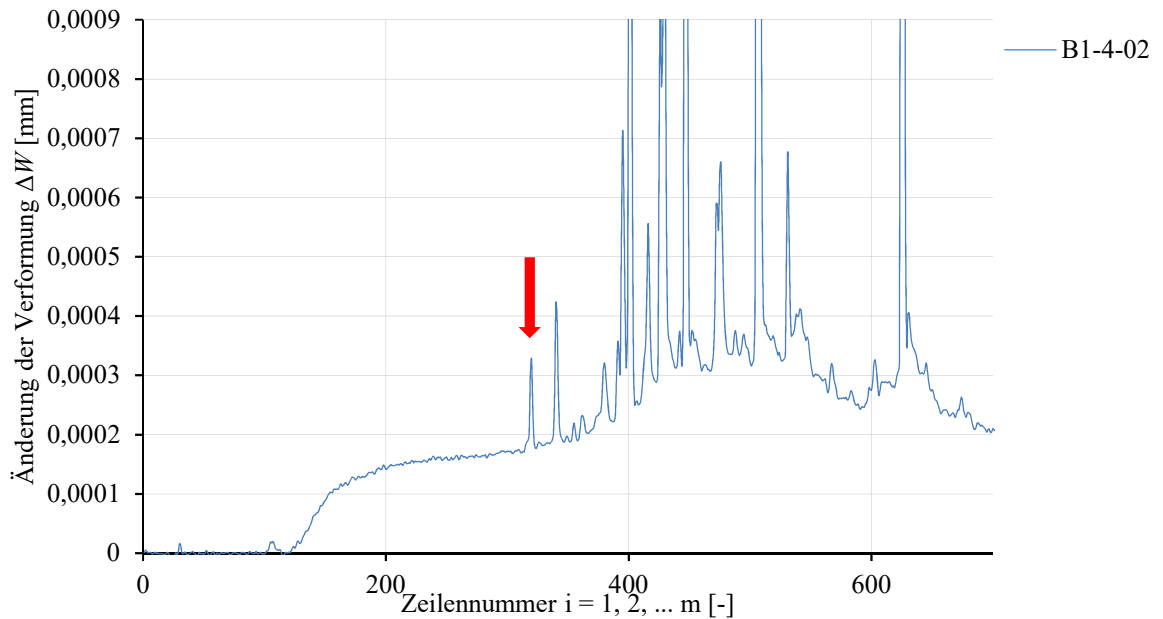


Abbildung 3-36: Änderung der Verformung Δw über die Zeilennummer für die Probe B1-4-02

Kraft-Zeit Diagramm

Im dazugehörigen Kraft-Zeit-Diagramm (siehe Abbildung 3-37) ist erkennbar, dass der erste Anriss kurz vor der Ausbildung des Fließgelenkes stattfindet, und daher noch im linear-elastischen Bereich zu liegen kommt. Bei den Kraft-Zeit-Diagrammen ist die Stelle des in der Auswertung bestimmten Anrisses mit einem schwarzen Punkt markiert. Die Kraft-Zeit-Diagramme für alle Serien sind in Anhang 5-1.2B-4 dargestellt. In einigen Diagrammen ist erkennbar, dass der erste Anriss häufig bereits kurz vor dem ersten im Kraft-Zeit-Diagramm ersichtlichen Ausschlag definiert wurde.

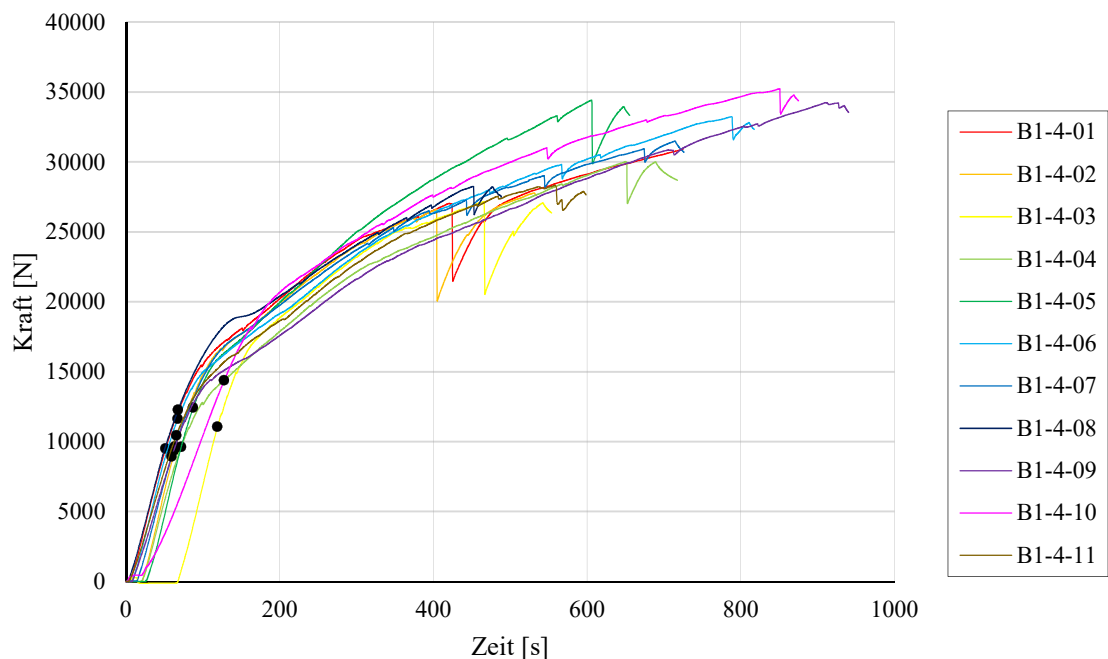


Abbildung 3-37: Kraft-Zeit-Diagramm Serie B1-4

Berücksichtigung der Stahldehnung

Die Wegaufnehmer erfassen den Weg zwischen dem Stahlblech und der Oberkante des Prüfkörpers. Ein weiterer Aspekt, der untersucht werden musste, ist die Stahldehnung des Stahlbleches während des Prüfvorganges. Die Stahldehnung zwischen dem Angriffspunkt des Stabdübels und der Montagepunkte der Wegaufnehmer am Stahlblech ist für die Korrektur des gemessenen Weges von Bedeutung. Um diese additive Wegkomponente aus den Messungen des lokalen Weges zwischen dem Prüfkörper und dem Stahlblech zu subtrahieren wurde wie folgt vorgegangen:

Im linear-elastischen Kraft-Verschiebungsbereich des Stahls kann mithilfe des E-Moduls und der Stahlspannung auf die Dehnung zurückgeschlossen werden.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.54)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1.55)$$

σ	Stahlspannung [N/mm ²]
E	Elastizitätsmodul des Stahls [N/mm ²]
ε	Dehnung des Stahls [%]
F	Kraft [N]
A	Stahlquerschnitt [mm ²]

Da die Kraft der Prüfmaschine, die Fläche des Stahlblech-Querschnittes und der E-Modul des Stahlbleches bekannt sind, errechnet sich die Dehnung zu:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{A \cdot E} \quad (1.56)$$

Die Dehnung gibt prinzipiell das Verhältnis der Längenänderung zur Ausgangslänge an, daraus lässt sich auf die Länge der zusätzlichen Stahldehnung des Stahlbleches schließen.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1.57)$$

$$\Delta l = \varepsilon \cdot l = \frac{F \cdot l}{A \cdot E} \quad (1.58)$$

Δl	Stahldehnung [mm]
l	Länge zwischen Stabdübel und Wegaufnehmer [mm]

Der gemessene Weg der Wegaufnehmer wird nun um die Dehnung des Stahlblechs korrigiert.

$$w_{\text{gem}} = w + \Delta l \quad (1.59)$$

$$w = w_{\text{gem}} - \Delta l \quad (1.60)$$

w	Weg zwischen Stahlblech und Oberkante des Prüfkörpers [mm]
w_{gem}	gemessener Weg des Wegaufnehmers [mm]

Diese Korrekturmaßnahme wurde in den Auswerte-Files implementiert. Mit diesem korrigierten Weg wurden alle weiteren Untersuchungen durchgeführt, wobei die Auswirkungen der Stahlblechdehnung allerdings nur einen minimalen Einfluss auf die Ergebnisse hatten. Aus diesen Untersuchungen der einzelnen Prüfkörper beziehungsweise Serien wurde dann eine Ergebnistabelle erstellt, welche als Inputdatei für die anschließende statistische Aufbereitung der Daten mithilfe der Software R fungierte.

Bestimmung des Verschiebemodul K_{ser}

Zur experimentellen Bestimmung des Verschiebungsmoduls K_{ser} sind in der Literatur mehrere Möglichkeiten bekannt, wie etwa das Vorgehen gem. ÖNORM EN 26891:1991 [46]. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Ermittlung des Verschiebungsmoduls jedoch abweichend von der ÖNORM EN 26891:1991 [46] wie folgt durchgeführt.

Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen wurde die Belastung bis zum Versagen kontinuierlich gesteigert. Folglich wurden die Werte für die Berechnung des gemessenen Verschiebungsmoduls anhand der tatsächlich aufgetretenen Maximalkraft F_{max} gewählt, das heißt im Bereich von 40 % und 10 % von F_{max} . Mit einer Regressionsfunktion wurde eine Gerade möglichst genau an den Graphen von Kraft über dem (um die Stahldehnung bereinigten) Weg angelegt. Diese Gerade wurde anschließend so lange im Bereich zwischen den zwei Kraftgrenzen angepasst, bis eine Korrelation von 0,9999 erreicht wurde. Der daraus erhaltene Wert wurde als der Verschiebungsmodul der Stabdübel-Verbindung angenommen. Diese Vorgehensweise ist im Kraft-Weg-Diagramm in Abbildung 3-38 dargestellt.

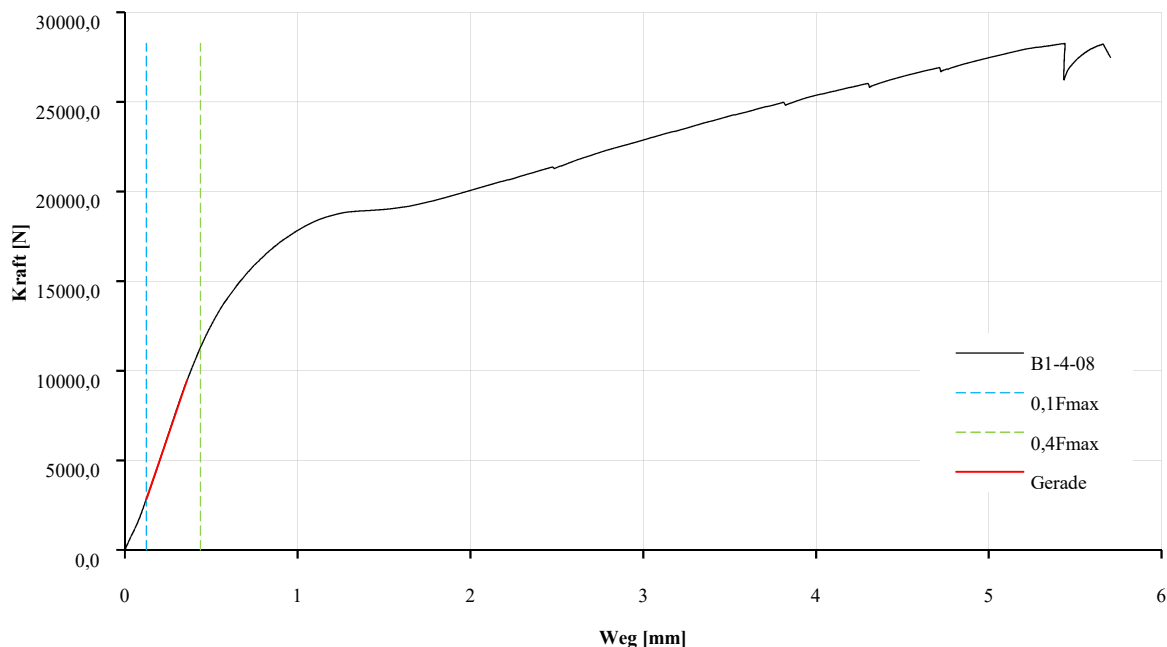


Abbildung 3-38: Definition der Ermittlung des Verschiebungsmoduls anhand des Kraft-Weg-Diagramms für die Probe B1-4-08

Rechnerische Ermittlung von K_{ser} gemäß EC5

Wenn der Verschiebemodul gemäß der ÖNORM B 1995-1-1:2019 [1] berechnet wird, ergibt sich dieser anhand der folgenden Formel:

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d}{23} \quad (1.61)$$

ρ_m Mittelwert der Rohdichte [kg/m^3]
 d Durchmesser des Stabdübels [mm]

Dieser Verschiebemodul bezieht sich je Scherfuge und Verbindungsmittel für eine Holz-Holz-Verbindung, für Stahl-Holz-Verbindungen sollte dieser Wert laut Norm mit dem Faktor 2 multipliziert werden.

KAPITEL 4: ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4-1 ERGEBNISSE DER FLIESSMOMENT-AUSWERTUNG

Die Ergebnisse der nach ÖNORM EN 409:2009 [37] wie in Abschnitt 3-3.1 beschrieben ermittelten FlieBmomente sind in Tabelle 4-1 angegeben, diese weisen eine geringe Streuung auf. Die Daten für die Ergebnisse mit einem Durchmesser von 12 mm stammen hierbei aus der Arbeit von Eckerstorfer [7], die Daten mit einem Durchmesser von 8 mm und 16 mm stammen aus den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen.

Tabelle 4-1: *Ergebnisse der FlieBmomente M_y für die Stabdübel mit $d = \{8, 12, 16\}$ mm*

Durchmesser d [mm]	8	12*	16
Anzahl Versuche [-]	10	10	10
Min [Nmm]	56.290	185.190	413.732
Max [Nmm]	63.806	201.720	461.975
Mittelwert [Nmm]	61.295	191.306	431.976
Stabw. [Nmm]	2.278	4.692	16.608
COV [%]	3,7	2,5	3,8
$q_{05,emp}$ [Nmm]	57.660	185.775	415.599

* aus Eckerstorfer [7] entnommen, da dieselben Stabdübel mit $d = 12$ mm verwendet wurden.

In Tabelle 4-2 sind folglich die 5 %-Quantilwerte der experimentell bestimmten FlieBmomente charakteristischen Werten gegenübergestellt, welche gem. ÖNORM B 1995-1-1 [1] für Stabdübel wie folgt bestimmt wurden:

$$M_{y,k,EC5} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (1.62)$$

$M_{y,k,EC5}$ FlieBmoment nach dem EC5 [Nmm]
 $f_{u,k}$ charakteristischer Wert der Zugfestigkeit [N/mm²]
 d Durchmesser des Stabdübels [mm]

Für die Zugfestigkeit des Stabdübel wird dabei der charakteristische Wert von 490 N/mm² eingesetzt. Das daraus resultierende charakteristische FlieBmoment weist deutlich niedrigere Werte auf (siehe Tabelle 4-2 $M_{y,k,EC5}$). Das experimentell ermittelte FlieBmoment ist ungefähr doppelt so groß wie das charakteristische FlieBmoment nach dem EC5 [1]. Diese Differenz erhöht sich zudem mit steigendem Durchmesser d . Wird für die Zugfestigkeit des Stabdübel der Mittelwert der Zugfestigkeit aus den Versuchen von Eckerstorfer [7] mit $f_{u,mean} = 644$ N/mm² herangezogen, liegen die Werte des EC5 [1] um 30 %÷ 40 % unter den ermittelten Werten (siehe Tabelle 4-2 $M_{y,mean,EC5}$). Dies ist womöglich darauf zurückzuführen, dass die tatsächliche Zugfestigkeit der Stabdübel den nominellen Wert für S355 übersteigt.

Tabelle 4-2: Vergleich des aus den Versuchen ermittelten Fließmoments mit den Werten nach EC5 [1]

Durchmesser [mm]	$M_{y,05,exp}$ [Nmm]	$M_{y,k,EC5}$ [Nmm]	$M_{y,mean,EC5}$ [Nmm]
8	57.660	32.761	43.057
12	185.775	94.013	123.560
16	415.599	198.623	261.047

4-2 ERGEBNISSE DER HAUPTVERSUCHE

Vor der Darstellung und der Diskussion der Ergebnisse wird nachfolgend noch die grundlegende Strukturierung der Ergebnisse erläutert. Um die einzelnen Serien untereinander zu vergleichen, werden diese in verschiedene übergeordnete Kategorien eingeteilt. Die folgenden Kategorien werden anschließend einzeln betrachtet:

- Einfluss der Durchmesservariation
- Einfluss der Variation der Seitenholzsclankheit und des Randabstandes
- Einfluss der Variation des Zwischenabstands

Bei der Variation des Durchmessers werden alle Serien mit einem Stabdübel in mittiger Lage ($a_{4,t} = 12 d$) mit einer Schlankheit von $\lambda = 2,5$ verglichen (Serien B1-4, B6-1 und B6-2). Der Durchmesser wird mit 8 mm, 12 mm und 16 mm eingesetzt.

Bei der Variation der Lage bzw. der Größe von $a_{4,t}$ und der Seitenholzsclankheit werden alle Serien mit einem Stabdübel und einem Durchmesser von $d = 12$ mm verglichen (B1-1, B1-2, B1-4, B1-5, B1-7, B1-8)

Bei der Variation des Zwischenabstands a_1 werden alle Serien mit $n = 3$ Stabdübel verglichen (B2-2, B2-4, B2-6, B4-1, B4-2, B4-3, B4-4, B4-5, B4-6).

4-2.1 HOLZFEUCHTE UND ROHDICHTE

4-2.1.1 Holzfeuchte

Aufgrund der vorherigen Trocknung und gleichen Lagerung wurde die Holzfeuchte der einzelnen Prüfserien als ziemlich ähnlich erwartet. In Tabelle 4-3 sind die Ergebnisse der Holzfeuchten der einzelnen Prüfserien ersichtlich. Die minimale Holzfeuchte aller Prüfkörper liegt bei 7,80 %, die maximale Holzfeuchte liegt bei 10,6 %, daraus ergibt sich eine Bandbreite von 2,77 %. Nachdem diese Schwankungsbreite in einem für Holz gewöhnlichen Ausmaß resultiert, wurde auf eine Berücksichtigung und Gewichtung der Ergebnisse hinsichtlich der Holzfeuchte verzichtet. Der Median der Holzfeuchte aller Prüfkörper ergibt sich zu 9,19 %, der Mittelwert zu 9,18 %.

Tabelle 4-3: Ergebnisse der ermittelten Holzfeuchte aller Serien

Serie	Anzahl Prüfkörper	Min	Max	Mittelwert	Median	COV
B1-1	10	8,16%	10,57%	9,20%	9,27%	6,83%
B1-2	10	8,67%	9,89%	9,32%	9,30%	4,27%
B1-4	11	8,66%	9,58%	9,14%	9,24%	4,04%
B1-5	10	8,61%	9,88%	9,20%	9,25%	4,30%
B1-7	10	8,48%	10,10%	9,19%	9,16%	4,63%
B1-8	10	9,05%	10,01%	9,50%	9,51%	3,61%
B2-2	5	8,62%	9,64%	9,19%	9,24%	4,17%
B2-4	5	9,04%	9,38%	9,21%	9,19%	1,58%
B2-6	5	8,62%	9,70%	9,18%	9,13%	4,87%
B4-1	5	8,49%	9,07%	8,78%	8,70%	2,85%
B4-2	4	8,22%	8,64%	8,41%	8,39%	2,35%
B4-3	5	7,80%	9,16%	8,42%	8,47%	5,95%
B4-4	5	9,14%	9,63%	9,33%	9,29%	2,15%
B4-5	5	9,20%	9,71%	9,46%	9,46%	2,41%
B4-6	5	8,84%	9,67%	9,32%	9,37%	3,20%
B6-1	10	8,75%	9,19%	8,95%	8,97%	1,71%
B6-2	10	9,31%	9,72%	9,50%	9,49%	1,56%

4-2.1.2 Rohdichte

Die auf eine Holzfeuchte von 12 % referenzierte Rohdichte ρ_{12} ist für sämtliche Serien in Tabelle 4-4 dargestellt. Die geringste Rohdichte unter allen Prüfkörpern ist mit 501 kg/m^3 bestimmt worden, die höchste Rohdichte beträgt 753 kg/m^3 , somit besteht eine Bandbreite von 252 kg/m^3 . Der Median aller Prüfkörper liegt bei 602 kg/m^3 , der Mittelwert bei 606 kg/m^3 , somit liegt der eingangs angenommene Wert für das Prüfmaterial von 600 kg/m^3 ziemlich nahe bei den beiden Lageparametern. In Abbildung 4-1 ist eine Boxplot-Darstellung der Rohdichte ρ_{12} aller Serien abgebildet. Insbesondere bei den Prüfserien mit größerer Versuchszahl ist größtenteils kein signifikanter Unterschied der mittleren Rohdichte erkennbar. Daher wurde von einer rohddichteabhängigen Korrektur der Prüfergebnisse in weiterer Folge abgesehen.

Tabelle 4-4: Ergebnisse der Rohdichte ρ_{12} aller Serien, in $[\text{kg}/\text{m}^3]$

Serie	Anzahl Prüfkörper	Min	Max	Mittelwert	Median	COV
B1-1	10	509	753	612	600	12,47%
B1-2	10	548	709	596	589	8,11%
B1-4	11	570	637	605	612	3,72%
B1-5	10	527	657	602	603	6,75%
B1-7	10	501	677	593	589	10,75%
B1-8	10	536	688	622	632	7,78%
B2-2	5	559	654	608	605	6,01%
B2-4	5	582	649	607	600	4,25%
B2-6	5	563	673	639	653	6,82%
B4-1	5	560	617	595	596	3,61%
B4-2	4	592	614	601	600	1,59%
B4-3	5	556	613	591	596	3,86%
B4-4	5	602	676	636	632	4,45%
B4-5	5	622	676	644	638	3,38%
B4-6	5	554	632	592	587	5,18%
B6-1	10	566	613	586	589	2,41%
B6-2	10	535	660	602	597	5,64%

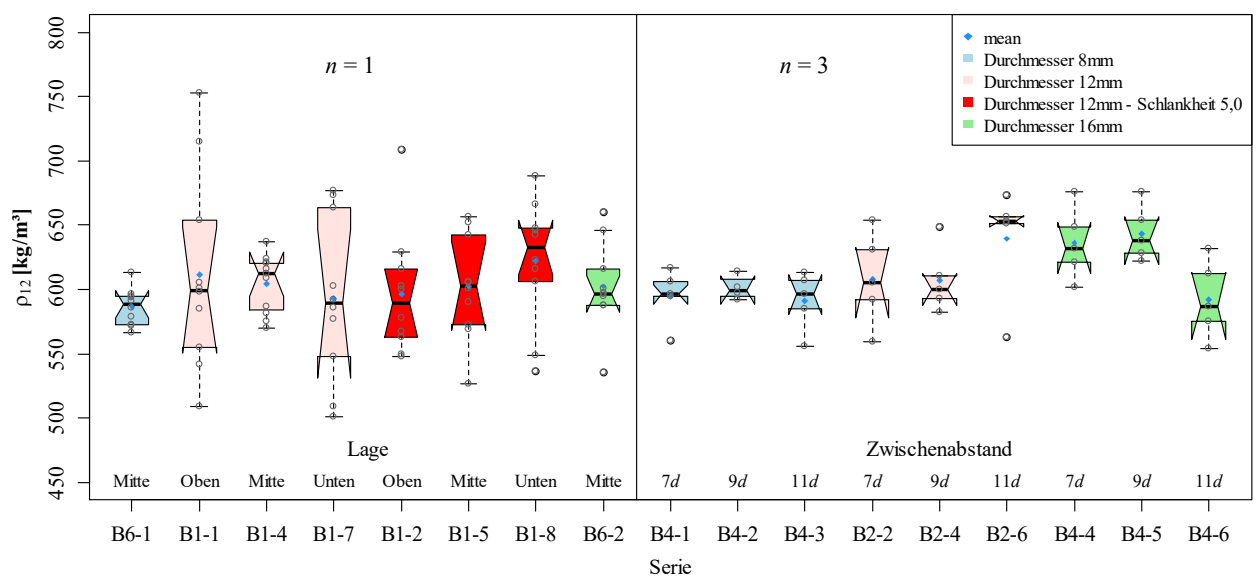


Abbildung 4-1: Boxplots der Rohdichte ρ_{12} aller Serien

4-2.2 VARIATION DES DURCHMESSERS

4-2.2.1 Anrisslast

Bei der Variation des Durchmessers werden die drei Serien mit je 10 Versuchen betrachtet, bei welchen ein Stabdübel mittig ($a_{4,t} = 12 d$) bei einer Seitenholzschlankheit von $\lambda = 2,5$ geprüft wurde. Im Vergleich der verschiedenen Stabdübel-Durchmesser von 8 mm, 12 mm und 16 mm ist die Abhängigkeit der Anrisslast vom Durchmesser, wie in Abbildung 4-2 in einem Boxplot dargestellt wird, gut zu erkennen. Wie in Tabelle 4-5 zusammenfassend dargestellt, beträgt der Mittelwert der Anrisslast für $d = 8$ mm $F_{riss,mean} = 6,7$ kN, für $d = 12$ mm, $F_{riss,mean} = 10,7$ kN und für $d = 16$ mm $F_{riss,mean} = 19,7$ kN. Ferner kann mit einem zunehmenden Durchmesser eine leichte Zunahme der Streuung bemerkt werden. Wenn man die Anrisslast wie in Gehri [3] mit einer Funktion in Abhängigkeit des Durchmessers ausdrücken möchte, ergibt sich die folgende Funktion als beste Übereinstimmung mit den Prüfergebnissen:

$$F_{riss} = 0,16 \cdot d^{1,73} \quad (1.63)$$

oder

$$F_{riss} = 0,08 \cdot d^2 \quad (1.64)$$

Im Vergleich zum Ansatz von Gehri [3] (siehe Abbildung 4-3, blaue Funktion), bei der der Durchmesser zum Quadrat enthalten ist, kommt der Durchmesser in der Funktion nur mit einer Potenz von 1,73 vor (siehe Abbildung 4-3, rote Funktion). Wird die Funktion mit einer Potenz von 2,0 ermittelt ergibt sich eine geringfügig abweichende Kurve (siehe Abbildung 4-3, grüne Funktion). Die Korrelation beider Kurven an die ermittelten Werte ist nahezu gleich, die grüne Funktion schneidet minimal besser ab. Aufgrund dieser Tatsache und der direkten Vergleichbarkeit zu Gehri's [3] Funktion wird die Funktion mit der Potenz von 2,0 festgelegt. Zu erkennen ist, dass Gehri's [3] Funktion deutlich größere Kennwerte angibt, das Verhältnis von 0,18 / 0,08 ergibt einen Faktor von 2,25. Dieses Verhältnis erscheint im Vergleich zur Differenz der allgemeinen mechanischen Kenngrößen von Birken- und Buchenholz unerwartet groß.

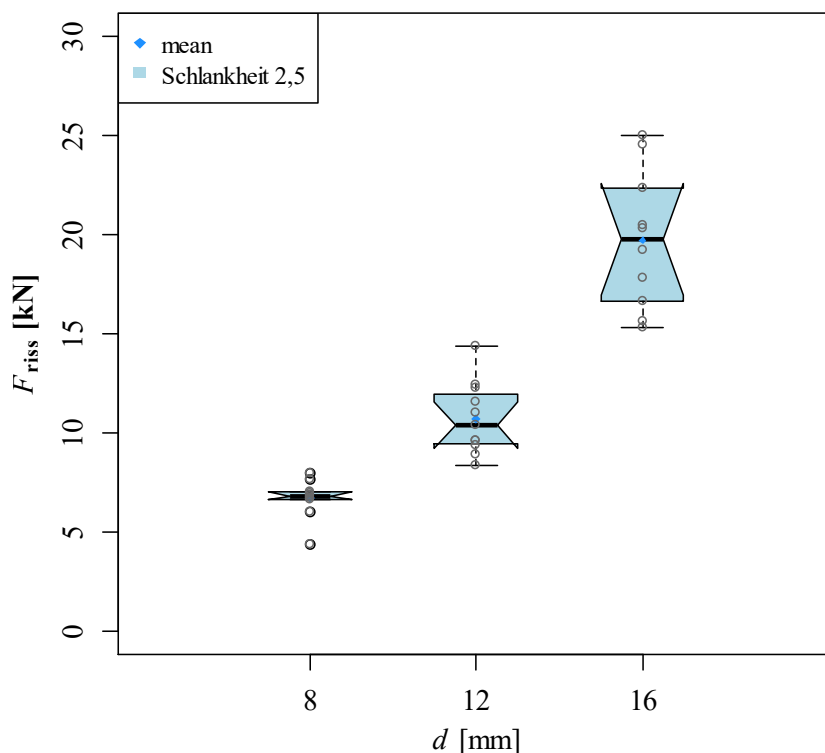


Abbildung 4-2: Ergebnisse für F_{riss} in Abhängigkeit des Durchmessers für $\lambda = 2,5$ und $a_{4,t} = 12 d$

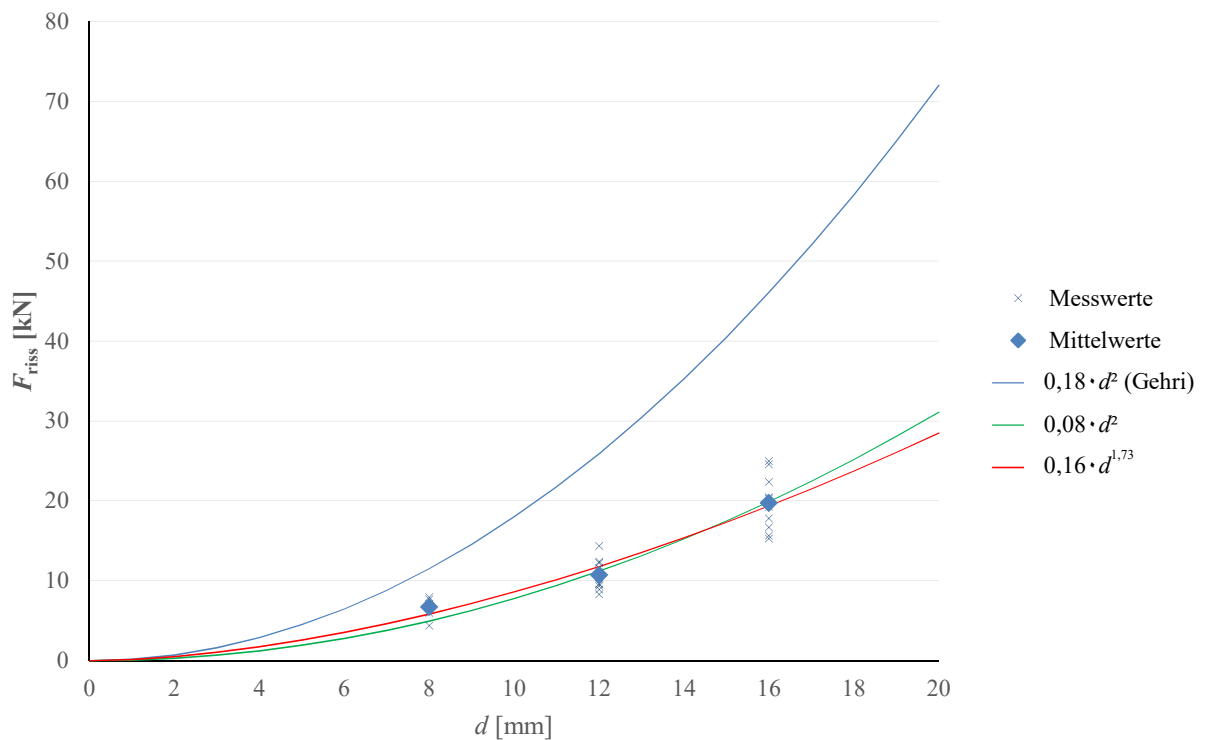


Abbildung 4-3: Vergleich der Untersuchung der Anrisslast in Abhängigkeit des Durchmessers mit dem Ansatz von Gehri [3]

4-2.2.2 Maximale Kraft

Die maximale Kraft bzw. die Laststeigerung, die nach dem ersten Anriss noch möglich ist, wurde ebenfalls für die Prüfserien bestimmt. Im Boxplot der Abbildung 4-4 wird diese in Abhängigkeit der Variation des Durchmessers für einen Stabdübel bei mittlerer Lage ($a_{4,t} = 12 d$) dargestellt. Die Abhängigkeit der maximalen Kraft vom Durchmesser des Stabdübels ist erneut deutlich erkennbar, mit einem größeren Durchmesser ergibt sich wieder auch eine größere Streuung der Werte. Für einen Durchmesser von 8 mm ergibt sich der Mittelwert der maximalen Kraft mit 15,9 kN, für den Durchmesser von 12 mm mit 31,0 kN und für den Durchmesser von 16 mm mit 55,3 kN. Die Abbildung 4-4 ähnelt der Abbildung 4-2, jedoch ist die maximale Kraft um den Faktor 2,4 bis 2,9 höher als die Anrisslast (siehe Tabelle 4-5, anhand des Mittelwert-Verhältnisses). Dies bedeutet, dass nach dem ersten Anriss noch eine große Laststeigerung bis zum Versagen der Konstruktion möglich ist.

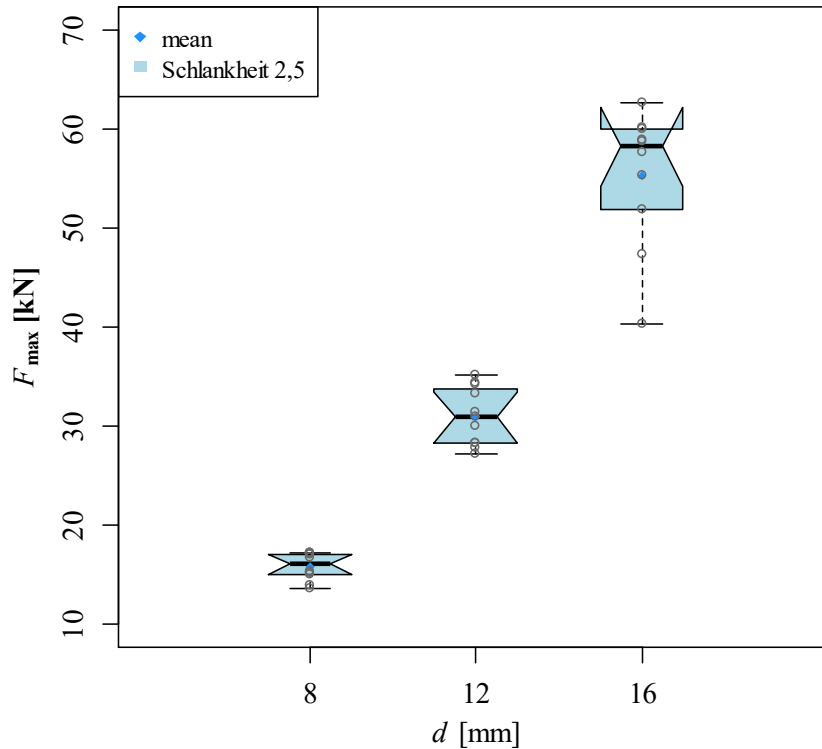


Abbildung 4-4: Ergebnisse für F_{max} in Abhängigkeit des Durchmessers für $\lambda = 2,5$ und $a_{4,t} = 12 d$

Tabelle 4-5: Vergleich von F_{riss} zu F_{max} für die Variation des Durchmessers

Serie	d	Kraft	Min	Max	Mittelwert	Median	COV	Mittelwertverhältnis F_{max}/F_{riss}
[-]	[mm]	[-]	[N]	[N]	[N]	[N]	[%]	[-]
B6-1	8	F_{riss}	4.381	7.963	6.715	6.828	14,64%	2,4
		F_{max}	13.625	17.256	15.855	16.037	8,87%	
B1-4	12	F_{riss}	8.337	14.366	10.721	10.437	16,87%	2,9
		F_{max}	27.172	35.245	31.013	30.921	9,46%	
B6-2	16	F_{riss}	15.310	24.983	19.743	19.785	17,56%	2,8
		F_{max}	40.392	62.743	55.337	58.244	12,49%	

4-2.2.3 Verschiebungsmodul

In Abbildung 4-5 sind die Boxplots des Verschiebungsmoduls in Abhängigkeit der Stabdübel-Durchmesser dargestellt. Der Mittelwert des Verschiebungsmoduls ist bei einem Durchmesser von 8 mm 16,4 kN/mm, bei einem Durchmesser von 12 mm 26,0 kN/mm und bei einem Durchmesser von 16 mm 35,8 kN/mm (siehe Tabelle 4-6). In der Abbildung 4-5 ist ein nahezu linearer Verlauf der Werte zu erkennen, was dem Berechnungsmodell gem. Eurocode 5 [1] entsprechen würde. Die Streuung der Werte ist bei allen Serien ähnlich.

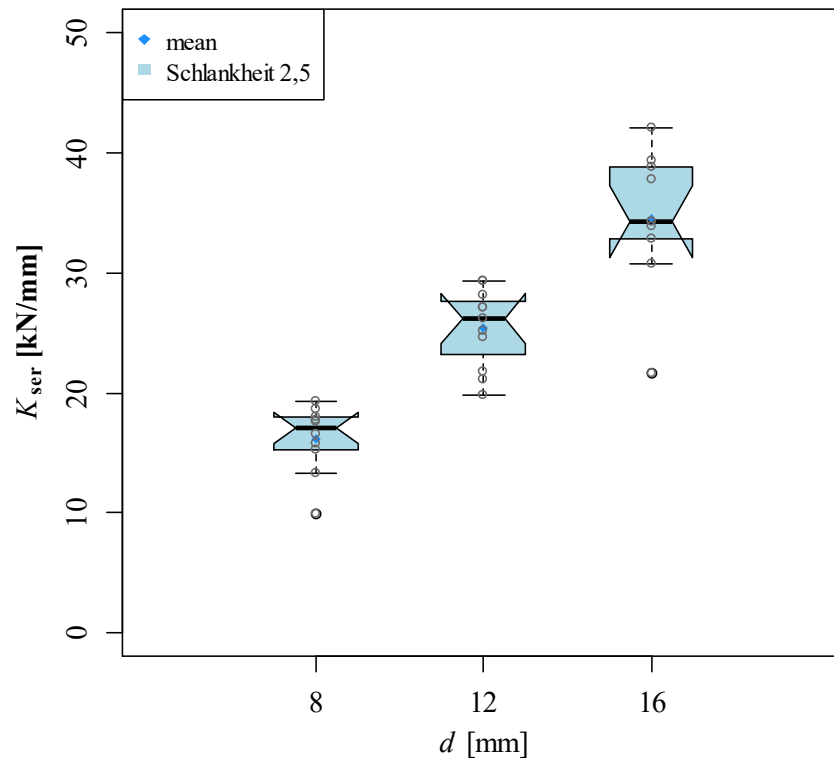


Abbildung 4-5: Ergebnisse für K_{ser} in Abhängigkeit des Durchmessers für $\lambda = 2,5$ und $a_{4,t} = 12 d$

Tabelle 4-6: Übersicht der Ergebnisse des Verschiebungsmoduls für die Variation des Durchmessers

Serie	d	Min	Max	Mittelwert	Median	COV
[-]	[mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[%]
B6-1	8	10.021	19.543	16.371	17.269	17,52%
B1-4	12	20.150	29.997	25.984	26.770	13,29%
B6-2	16	22.139	43.894	35.847	35.469	17,02%

4-2.3 VARIATION DER LAGE UND DER SEITENHOLZSCHLANKHEIT

4-2.3.1 Anrisslast

Nachfolgend wird der Einfluss der Variation der Lage im Sinne von $a_{4,t}$ und der Seitenholzschlankheit λ für $n = 1$ Stabdübel mit einem Durchmesser von $d = 12$ mm diskutiert. In der Abbildung 4-6 sind die dafür relevanten Serien in einem Boxplot-Diagramm dargestellt. Die Bezeichnungen „Oben“, „Mitte“ und „Unten“ beziehen sich auf den Abstand zum beanspruchten Rand $a_{4,t}$ von $4 d$, $12 d$ und $20 d$.

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse ist bei den Serien mit einer Seitenholzschlankheit von $\lambda = 2,5$ kein Einfluss der Lage des Stabdübels feststellbar. Dies bestätigt an sich den Ansatz von Gehri [3] mit der Aussage, dass die Anrisslast nur von den lokalen Holzeigenschaften abhängig ist. Bei den Ergebnissen der Serien mit der größeren Schlankheit von $\lambda = 5,0$ (siehe rote Boxplots in Abbildung 4-6) kann diese Aussage hingegen nicht bestätigt, jedoch auch nicht vollständig widerlegt werden, da einerseits die Ergebnisse dieser Serien vergleichsweise stark streuen und andererseits die Bestimmung von F_{riss} für $\lambda = 5,0$ mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist (siehe Abschnitt 3-3.2.6).

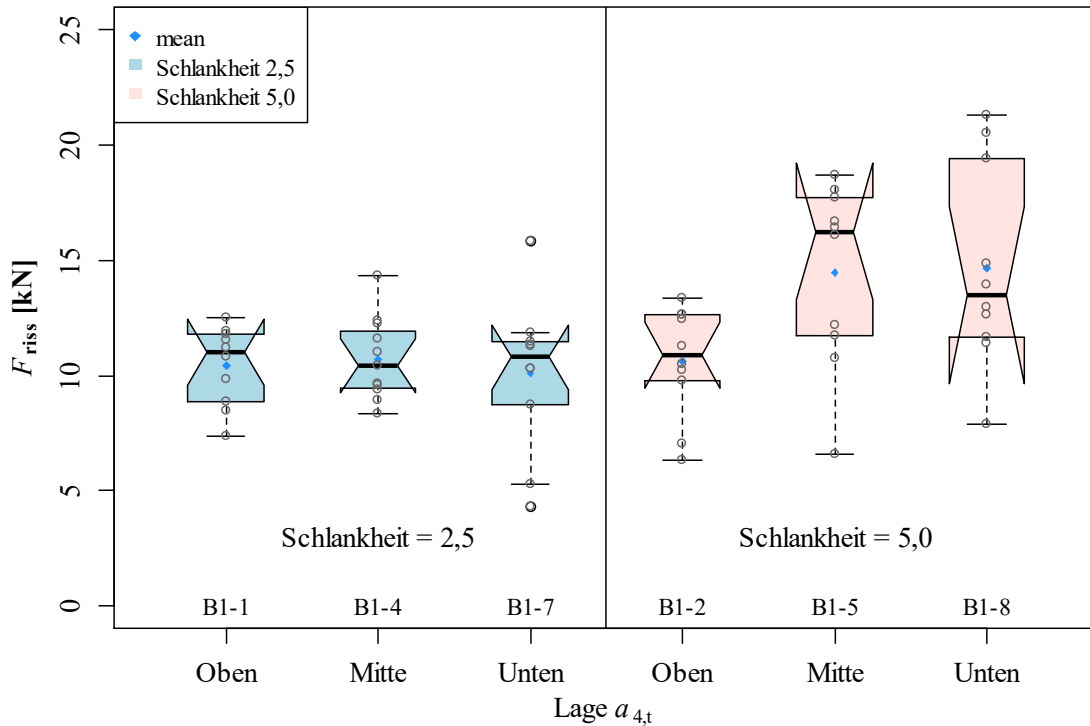


Abbildung 4-6: Ergebnisse für F_{riss} bei $d = 12 \text{ mm}$, Variation der Schlankheit und der Lage des Stabdübels

4-2.3.2 Maximale Kraft

Im Unterschied zur Anrisslast F_{riss} hat der Abstand zum belasteten Rand $a_{4,t}$ einen signifikanten Einfluss auf die Größe von F_{max} , siehe Abbildung 4-7. Bei der Variation der Lage ist eindeutig zu erkennen, dass mit zunehmender Größe von $a_{4,t}$ die maximale Kraft signifikant gesteigert werden kann. Das kann sowohl für die Schlankheit von 2,5 wie auch für die Schlankheit von 5,0 festgestellt werden. Diese Differenz gilt jedoch nur zwischen $a_{4,t} = 4d$ und $12d$, eine weitere Vergrößerung des Randabstands führt demnach zu keiner weiteren Steigerung der Maximalkraft. Im Verhältnis zur Anrisslast beträgt die maximale Kraft rund das 2 bis 3-fache, mit Ausnahme der Serie B1-1, bei dieser ist die maximale Kraft nur rund 30 % höher als die Anrisslast (siehe Tabelle 4-7). Das ist auch in Abbildung 4-7 erkennbar, der blaue Boxplot mit der Lage „Oben“ weist deutlich geringere Werte auf im Vergleich zu den restlichen Serien.

Für die Größe der Maximalkraft ist demnach nicht die lokale Holzeigenschaft von Bedeutung, sondern – bis zu einem gewissen Grad – die Größe des Randabstandes $a_{4,t}$. Somit wird das Nachweisformat des EC5 [1] zumindest qualitativ bestätigt.

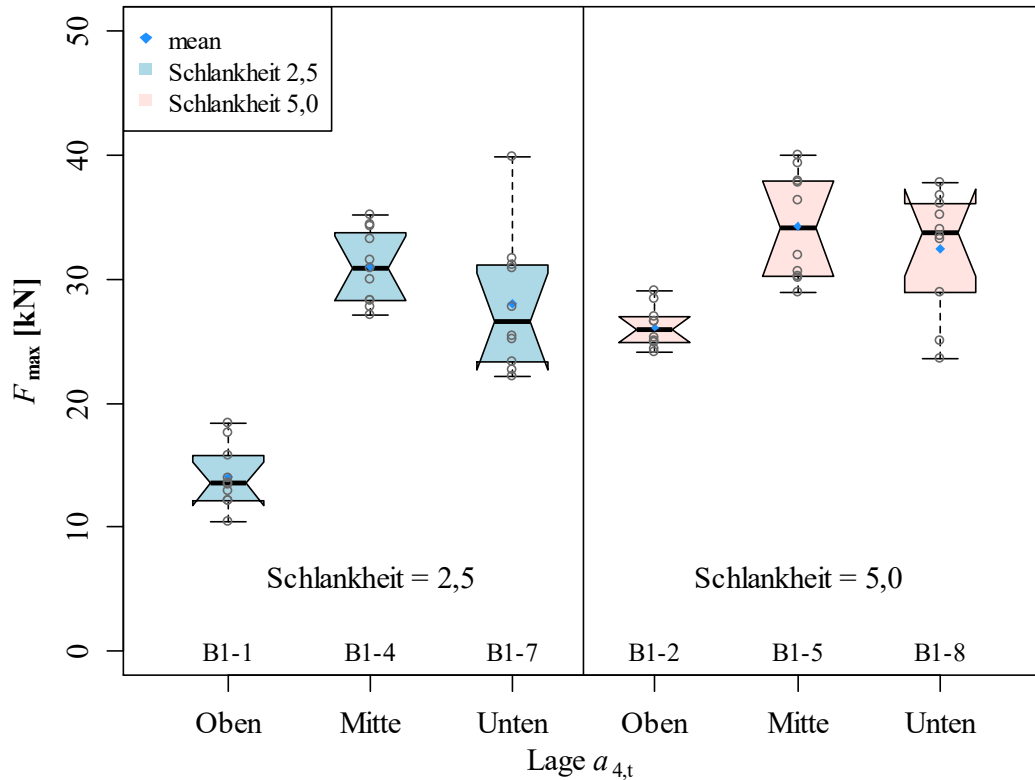


Abbildung 4-7: Ergebnisse für F_{riss} bei $d = 12 \text{ mm}$, Variation der Schlankeheit und der Lage des Stabdübels

Tabelle 4-7: Vergleich von F_{riss} zu F_{max} für die Variation der Lage und der Seitenholzschlankeheit

Serie	Lage	λ	Kraft	Min	Max	Mittelwert	Median	COV	F_{max}/F_{riss}
[-]	[-]	[-]	[-]	[N]	[N]	[N]	[N]	[%]	[-]
B1-1	Oben	2,5	F_{riss}	7.378	12.518	10.442	11.020	16,32%	1,3
			F_{max}	10.392	18.340	14.028	13.501	17,84%	
B1-4	Mitte	2,5	F_{riss}	8.337	14.366	10.721	10.437	16,87%	2,9
			F_{max}	27.172	35.245	31.013	30.921	9,46%	
B1-7	Unten	2,5	F_{riss}	4.328	15.855	10.078	10.796	33,03%	2,8
			F_{max}	22.184	39.898	28.641	28.712	18,32%	
B1-2	Oben	2,5	F_{riss}	6.341	13.330	10.631	10.905	22,51%	2,5
			F_{max}	24.163	29.095	26.128	25.943	6,51%	
B1-5	Mitte	2,5	F_{riss}	6.580	18.725	14.488	16.257	27,35%	2,4
			F_{max}	28.980	40.056	34.322	34.105	12,64%	
B1-8	Unten	2,5	F_{riss}	7.917	21.326	14.668	13.476	29,96%	2,2
			F_{max}	23.641	37.856	32.426	33.742	15,11%	

4-2.3.3 Verschiebungsmodul

In Abbildung 4-8 sind die Ergebnisse des Verschiebungsmoduls K_{ser} in Abhängigkeit der Lage der Stabdübel und der Seitenholzschlankheit dargestellt. Zu erkennen ist, dass bei einer Schlankheit von 5,0 (Abbildung 4-8, rote Boxplots) etwas größere Werte für K_{ser} als bei der Schlankheit von 2,5 (Abbildung 4-8, blaue Boxplots) erreicht werden. Ferner nimmt der Verschiebungsmodul mit größer werdendem Abstand zum beanspruchten Rand $a_{4,t}$ bei beiden Schlankheiten sukzessive ab (siehe Tabelle 4-8). Auf Basis der vorliegenden Bandbreite an Untersuchungen kann der Grund für dieses Verhalten nicht eindeutig erklärt werden.

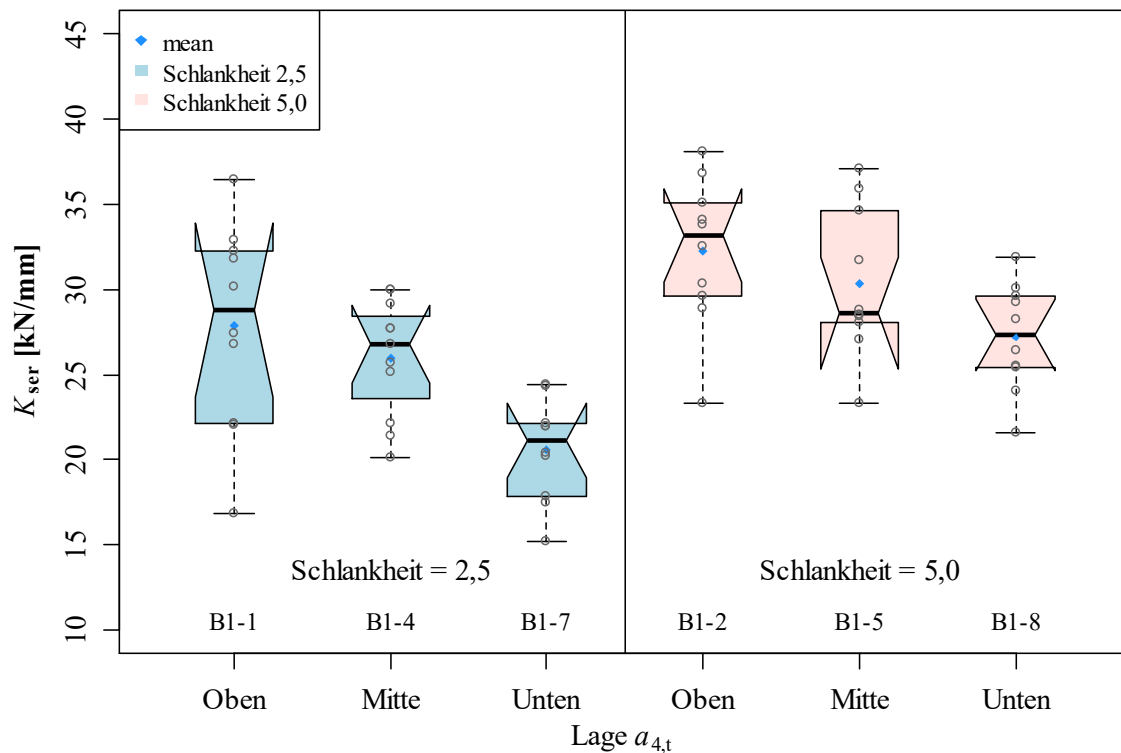


Abbildung 4-8: Ergebnisse für K_{ser} bei $d = 12 \text{ mm}$, Variation der Schlankheit und der Lage des Stabdübels

Tabelle 4-8: Übersicht der Ergebnisse des Verschiebungsmoduls für die Variation der Lage und der Seitenholzschlankheit

Serie	Lage	λ	Min	Max	Mittelwert	Median	COV
[-]	[-]	[-]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[%]
B1-1	Oben	2,5	16.853	36.417	27.883	28.812	21,69%
B1-4	Mitte	2,5	20.150	29.997	25.984	26.770	13,29%
B1-7	Unten	2,5	15.217	24.396	20.581	21.151	14,55%
B1-2	Oben	5,0	23.347	38.082	32.258	33.178	13,46%
B1-5	Mitte	5,0	23.361	37.067	30.347	28.646	14,37%
B1-8	Unten	5,0	21.582	31.876	27.194	27.310	11,59%

4-2.4 VARIATION DES ZWISCHENABSTANDS

4-2.4.1 Anrisslast

Bei den Versuchen mit $n = 3$ Stabdübeln hintereinander in Faserrichtung ($a_{4,t} = 12 d$) wurde der Zwischenabstand a_1 für alle untersuchten Stabdübel Durchmesser variiert, während die Schlankheit für alle Serien mit $\lambda = 2,5$ festgehalten wurde. Diese Serien bestehen jeweils aus 5 Versuchen, bei der Auswertung hat sich die Anzahl der Versuche je Serie als zu gering herausgestellt (Ausreißer haben einen großen Einfluss, bei Wegfallen eines Versuches, wie bei der Serie B4-2 aufgrund eines Software-Ausfalles der Prüfmaschine, entfällt ein relevanter Teil der Daten). Der Ansatz bei dieser Untersuchung war, den Mindestabstand a_1 zu identifizieren, ab dem sich kein Einfluss mehr der nebeneinanderliegenden Stabdübel ergibt. Somit sollte bei genügend großem Abstand a_1 auf drei Stabdübel ungefähr die dreifache Anrisslast eines einzelnen Stabdübel übertragbar sein. Dieses Lastverhältnis wird in Tabelle 4-9 in Form des Mittelwert-Verhältnisses $F_{riss,3}/F_{riss,1}$ dargestellt. Darin ist ersichtlich, dass für die untersuchten Abstände a_1 maximal nur eine zirka doppelt so hohe Lastaufbringung bei $n = 3$ gegenüber $n = 1$ Stabdübel möglich ist, was zudem mit steigendem Durchmesser abnimmt. Ein weiteres Anzeichen für einen nicht vorhandenen Einfluss ist die scheinbar zufällige Zu- oder Abnahme der Werte in Abhängigkeit von a_1 , vgl. Abbildung 4-9. Mit der Vergrößerung des Zwischenabstandes sollte auch eine Erhöhung der Anrisslast bemerkbar sein, was auf Basis der vorliegenden Ergebnisse augenscheinlich nicht der Fall ist. Zu berücksichtigen ist, dass im Zuge der Auswertung die Anrisslast nicht immer exakt bestimmt werden konnte und dadurch eine gewisse Unsicherheit vorhanden ist (siehe Abschnitt 3-3.2.6).

Ein möglicher Grund für die abweichenden Ergebnisse könnte die Einbau-Situation sein. Der Abbund der Prüfkörper wurde extern von einem Holzverarbeitungsbetrieb durchgeführt, was fertigungstechnisch damit der üblichen Praxis entsprach. Dabei stellten sich die Bohrungen bei den Prüfkörpern mit drei Stabdübeln als teilweise nicht ganz exakt heraus. Bei vielen Prüfungen konnte der dritte Stabdübel aufgrund von Ungenauigkeiten nur unter größerer Kraft-Aufbringung mithilfe eines Hammers eingeschlagen werden. Aus dieser Krafteinbringung könnte es im Prüfkörper schon vor der Belastung durch die Prüfmaschine zu Spannungen kommen, welche dann die Beanspruchbarkeit gegen Querkraft womöglich vermindern.

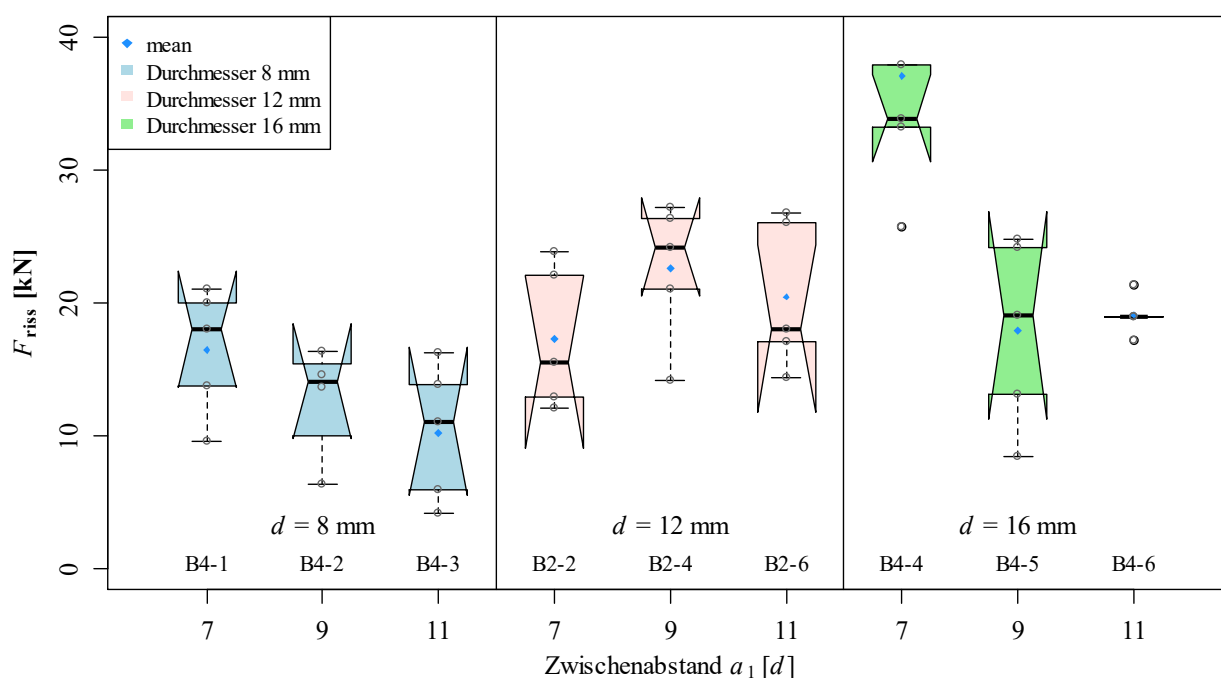


Abbildung 4-9: Ergebnisse für F_{riss} bei der Variation des Zwischenabstands a_1

Tabelle 4-9: Vergleich der Anrisslast zwischen den Versuchen mit 3 Stabdübel und 1 Stabdübel

Serie	d	n	a_1	Anzahl	Min	Max	Mean	Median	COV	$F_{\text{riss},3}/F_{\text{riss},1}$
[-]	[mm]	[-]	[d]	[-]	[N]	[N]	[N]	[N]	[%]	[-]
B6-1	8	1		10	4.381	7.963	6.715	6.828	14,64%	
B4-1	8	3	7	5	9.583	21.019	16.481	18.017	28,79%	2,5
B4-2	8	3	9	4	6.391	16.376	12.748	14.112	34,42%	1,9
B4-3	8	3	11	5	4.134	16.230	10.242	11.090	50,15%	1,5
B1-4	12	1		11	8.337	14.366	10.721	10.437	16,87%	
B2-2	12	3	7	5	12.131	23.910	17.323	15.530	31,08%	1,6
B2-4	12	3	9	5	14.188	27.202	22.606	24.225	23,28%	2,1
B2-6	12	3	11	5	14.361	26.777	20.481	18.090	27,30%	1,9
B6-2	16	1		10	15.310	24.983	19.743	19.785	17,56%	
B4-4	16	3	7	5	25.741	54.723	37.119	33.932	29,05%	1,9
B4-5	16	3	9	5	8.494	24.765	17.931	19.080	39,35%	0,9
B4-6	16	3	11	5	17.247	21.427	19.128	18.974	7,79%	1,0

4-2.4.2 Maximale Kraft

Im Gegensatz zur Anrisslast, kann durch eine Erhöhung des Zwischenabstandes a_1 eine geringfügig höhere Maximalkraft erreicht werden, siehe Abbildung 4-10. Aufgrund der geringen Anzahl an Versuchen und dem geringen, teilweise nicht signifikanten Kraftzuwachs ist diese Aussage jedoch mit Unsicherheit behaftet. Die Annahme, dass bei genügend großem Zwischenabstand die maximale Kraft eines Stabdübels mit der Anzahl der verwendeten Stabdübel multipliziert werden kann, kann durch die vorliegenden Ergebnisse jedoch nicht bestätigt werden. Ähnlich wie bei F_{riss} kann für die maximale Kraft F_{max} für $n = 3$ Stabdübel nur eine ungefähr doppelt so große Kraft im Vergleich zu $n = 1$ erreicht werden (siehe Tabelle 4-10).

Diese Tatsache ist nicht unbedenklich, lt. Eurocode 5 [1] sollte der Zwischenabstand a_1 keinen Einfluss haben, bei einer Beanspruchung quer zur Faser kann in der Bemessung die Anzahl der Stabdübel mit $n = n_{\text{ef}}$ angesetzt werden.

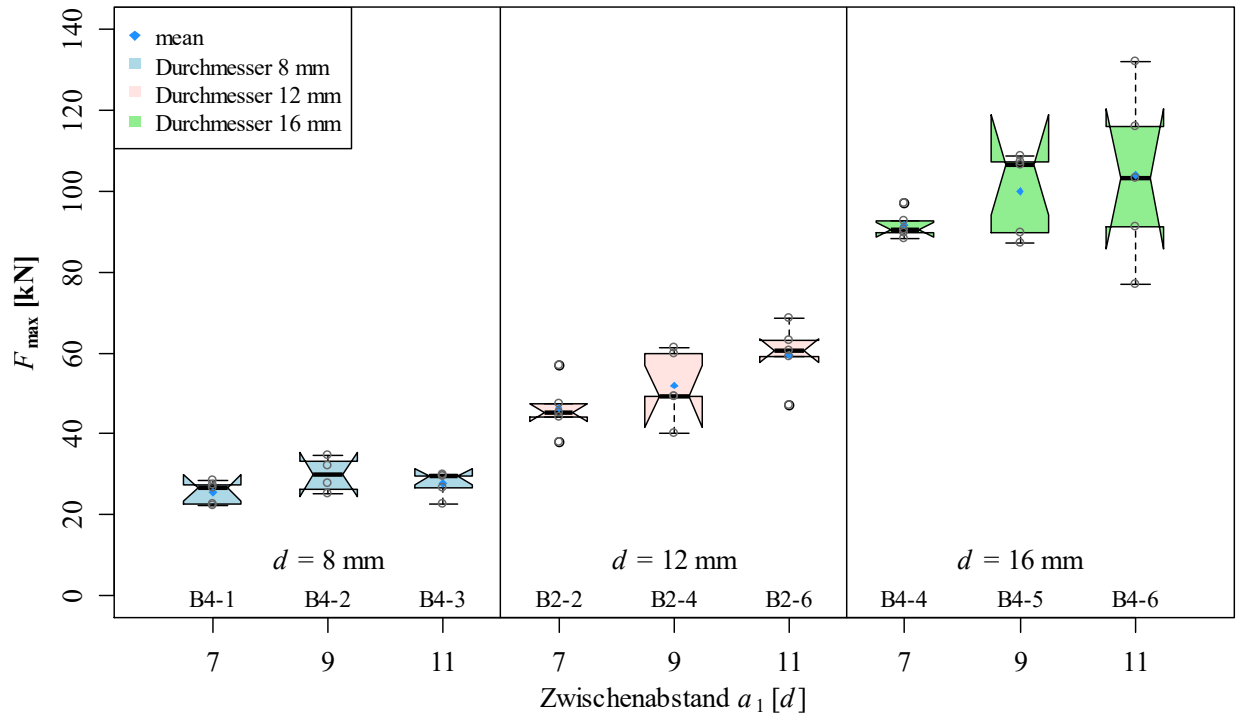


Abbildung 4-10: Ergebnisse für F_{max} bei der Variation des Zwischenabstands a_1

Tabelle 4-10: Vergleich der Maximalkraft zwischen den Versuchen mit 3 Stabdübel und 1 Stabdübel

Serie	d	n	a_1	Anzahl	Min	Max	Mean	Median	COV	$F_{max,3}/F_{max,1}$
[-]	[mm]	[-]	[d]	[-]	[N]	[N]	[N]	[N]	[%]	[-]
B6-1	8	1		10	13.625	17.256	15.855	16.037	8,87%	
B4-1	8	3	7	5	22.323	28.462	25.497	26.649	10,92%	1,6
B4-2	8	3	9	4	25.072	34.516	29.821	29.848	14,22%	1,9
B4-3	8	3	11	5	22.659	30.098	27.665	29.406	11,24%	1,7
B1-4	12	1		11	27.172	35.245	31.013	30.921	9,46%	
B2-2	12	3	7	5	37.952	56.965	46.397	45.216	14,85%	1,5
B2-4	12	3	9	5	40.178	61.273	52.001	49.338	16,79%	1,7
B2-6	12	3	11	5	46.953	68.472	59.600	60.575	13,31%	1,9
B6-2	16	1		10	40.392	62.743	55.337	58.244	12,49%	
B4-4	16	3	7	5	88.422	97.247	91.733	90.482	3,73%	1,7
B4-5	16	3	9	5	87.376	108.749	99.882	106.446	10,46%	1,8
B4-6	16	3	11	5	77.153	132.162	103.970	103.179	20,50%	1,9

4-2.4.3 Verschiebungsmodul

In Abbildung 4-11 sind die Ergebnisse des Verschiebungsmoduls K_{ser} in Abhängigkeit des Zwischenabstandes und des Stabdübel-Durchmessers dargestellt. Die Abhängigkeit der Ergebnisse vom

Durchmesser ist deutlich sichtbar, es kann erneut ein ungefähr linearer Zusammenhang erkannt werden. Eine Änderung des Zwischenabstandes hat keinen Einfluss auf den Verschiebungsmodul. Bei manchen Serien sind sehr große Ausreißer beziehungsweise aufgrund der geringen Anzahl der Versuche (5) große Streuungen erkennbar (siehe Abbildung 4-11, rote Boxplots). Wie in Tabelle 4-11 erkennbar ist, kann mit drei Stabdübeln der dreifache K_{ser} einer Verbindung mit einem Stabdübel erreicht werden (außer für die Serien mit $d = 8$ mm).

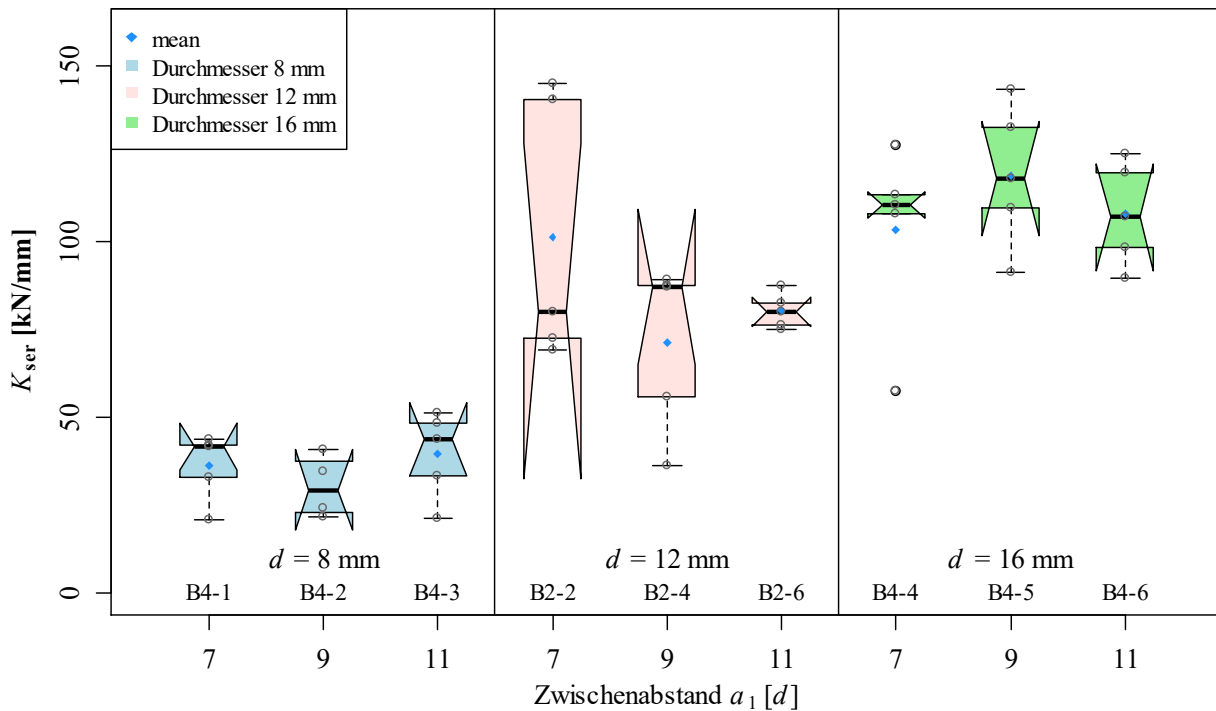


Abbildung 4-11: Ergebnisse für K_{ser} bei der Variation des Zwischenabstandes a_1

Tabelle 4-11: Vergleich des Verschiebungsmoduls von 3 Stabdübel mit 1 Stabdübel

Serie	d	n	a_1	Anzahl	Min	Max	Mean	Median	COV	$K_{ser,3}/K_{ser,1}$
[-]	[mm]	[-]	[d]	[-]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[%]	[-]
B6-1	8	1		10	10.021	19.543	16.371	17.269	17,52%	
B4-1	8	3	7	5	20.994	44.851	37.001	42.580	26,97%	2,3
B4-2	8	3	9	4	21.808	41.388	30.666	29.735	29,73%	1,9
B4-3	8	3	11	5	21.355	52.117	40.187	44.658	31,36%	2,5
B1-4	12	1		11	20.150	29.997	25.984	26.770	13,29%	
B2-2	12	3	7	5	71.084	154.352	106.487	82.954	39,01%	4,1
B2-4	12	3	9	5	36.675	92.347	73.524	90.449	34,47%	2,8
B2-6	12	3	11	5	77.066	90.168	82.287	82.135	6,35%	3,2
B6-2	16	1		10	22.139	43.894	35.847	35.469	17,02%	
B4-4	16	3	7	5	59.131	135.119	108.382	115.682	26,60%	3,0
B4-5	16	3	9	5	94.185	151.102	124.241	122.972	17,79%	3,5
B4-6	16	3	11	5	92.253	129.808	111.699	110.609	13,95%	3,1

4-2.5 VERGLEICH DES VERSCHIEBUNGSMODULS

Der aus den Versuchen ermittelte Verschiebungsmodul K_{ser} wird im Folgenden mit der im Eurocode 5 der ÖNORM B 1995-1-1:2019 [1] vorgeschlagenen Berechnungsmethode verglichen (siehe Abschnitt 3-3.2.6). Anstatt des Mittelwertes der Rohdichte werden jedoch die auf 12 % Holzfeuchte bezogene Dichte ρ_{12} der einzelnen Versuche verwendet. In der Tabelle 4-12 werden die ermittelten K_{ser} -Werte mit den Werten nach dem EC5 [1] verglichen, dabei werden jeweils die Mittelwerte verwendet. Im Vergleich ist erkennbar, dass die ermittelten K_{ser} -Werte meist etwas geringer ausgefallen sind, als die nach EC5 [1] errechneten Werte. Die Serie B4-2 kann als Ausreißer betrachtet werden, der EC5-Wert ist mehr als doppelt so hoch wie die ermittelten Werte (siehe Tabelle 4-12, Serie B4-2) Im Durchschnitt sind die EC5-Werte um 20 % größer, einzig bei den Serien B1-2 und B2-2 sind die ermittelten Werte größer als die EC5-Werte. Im Streupunkt-Diagramm in Abbildung 4-12 ist dieser Zusammenhang erkennbar, das Bestimmtheitsmaß der roten Regressionsgerade ergibt sich zu $R^2 = 0,805$. Die Versuche mit einem Stabdübel haben verhältnismäßig geringe Streuungen, tendenziell liegen die ermittelten Werte etwas unterhalb der nach EC5 [1] errechneten Werte (siehe Daten-Cluster in Abbildung 4-12). Auffällig ist, dass sämtliche Serien mit drei Stabdübeln des Durchmessers $d = 8$ mm deutlich höhere EC5-Werte aufweisen. Die Versuche mit drei Stabdübel $d = 12$ mm und $d = 16$ mm weisen sehr große Streuungen auf.

Tabelle 4-12: Vergleich K_{ser} ermittelt mit errechnetem K_{ser} nach EC5

Serie	$K_{ser,Mean}$ [N/mm]	$K_{ser EC5Mean}$ [N/mm]	Abweichung [%]
B1-1	27.883	31.737	13,82%
B1-2	32.258	30.461	-5,57%
B1-4	25.984	31.055	19,52%
B1-5	30.347	30.898	1,81%
B1-7	20.581	30.264	47,05%
B1-8	27.194	32.436	19,28%
B2-2	106.487	94.028	-11,70%
B2-4	73.524	93.654	27,38%
B2-6	82.287	101.354	23,17%
B4-1	37.001	60.580	63,73%
B4-2	30.666	61.559	100,74%
B4-3	40.187	60.068	49,47%
B4-4	108.382	133.986	23,62%
B4-5	124.241	136.350	9,75%
B4-6	111.699	120.349	7,74%
B6-1	16.371	19.759	20,69%
B6-2	35.847	41.172	14,86%

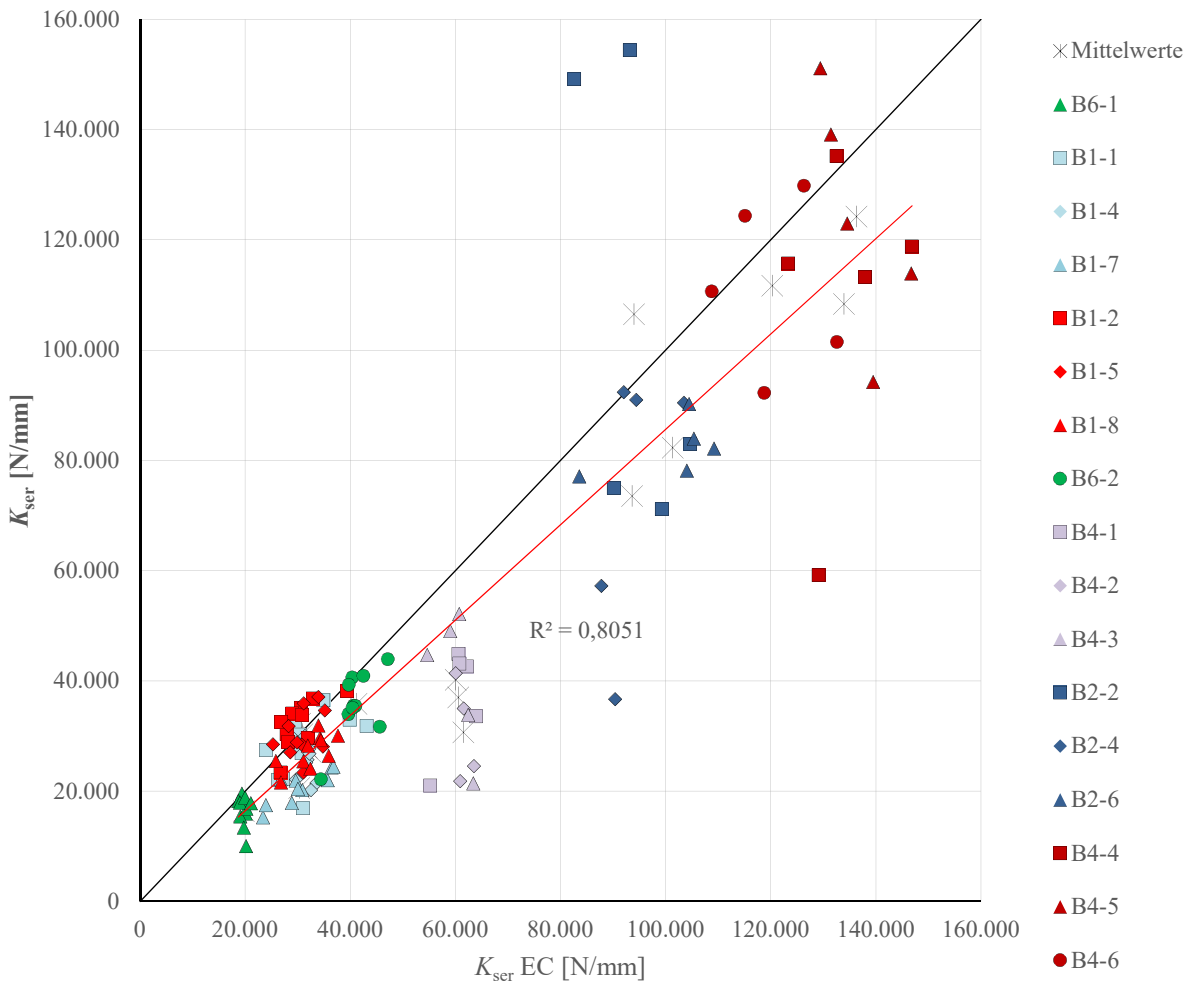


Abbildung 4-12: Vergleich der ermittelten mit den nach EC5 errechneten K_{ser} Werten aller Serien in einem Streupunkt-Diagramm

4-2.6 ERGEBNISSE IN FORM DER LOCHLEIBUNGSFESTIGKEIT

Die Anrisslast beschreibt den Wert der maximalen Kraft, der von der Stabdübelverbindung aufgenommen werden kann, bis das Holz einen ersten Riss quer zur Faser ausbildet. Dieser Wert gilt für die gesamte Verbindung, Versuchsreihen mit verschiedenen Parameterausprägungen können daher nicht einfach anhand dieses Wertes verglichen werden. Wenn man die Kraft jedoch auf die Lochleibungsfläche bezieht, erhält man die Lochleibungsfestigkeit $f_{h,riss}$, mithilfe dieser ein solcher Vergleich möglich ist:

$$f_{h,riss} = \frac{F_{riss}}{d \cdot t} \quad (1.65)$$

$f_{h,riss}$ Lochleibungsfestigkeit bei F_{riss} [N/mm²]
 t Seitenholzdicke [mm]

In Tabelle 4-13 wird der $f_{h,riss}$ -Mittelwert für alle Serien dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die $f_{h,riss}$ -Werte für eine Schlankheit von 5,0 geringer sind, verglichen mit den identen Versuchen der Schlankheit von 2,5. Das resultiert höchstwahrscheinlich aus der (durch die Fließgelenkbildung verursachten) ungleichmäßigen Belastung, die zum ersten Anriss führte. Die Serien mit drei Stabdübel weisen ebenfalls geringere $f_{h,riss}$ -Werte verglichen mit den Serien mit einem Stabdübel auf. In diesem Fall könnte auf die ungewollte Vorbelastung durch die Einbausituation geschlossen werden.

Tabelle 4-13: *Übersicht der f_{hriss} Mittelwerte je Serie*

Serie	Mittelwert [N/mm²]
B1-1	14,50
B1-2	7,38
B1-4	14,89
B1-5	10,06
B1-7	14,00
B1-8	10,19
B2-2	8,02
B2-4	10,47
B2-6	9,48
B4-1	17,17
B4-2	13,28
B4-3	10,67
B4-4	9,67
B4-5	4,67
B4-6	4,98
B6-1	20,98
B6-2	15,42

KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG

5-1.1 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Aus den Ergebnissen des in Kapitel 3 und 4 vorgestellten, experimentellen Programms können folgende Informationen zusammengefasst werden:

Alle Versuche mit einem Stabdübel-Durchmesser von $d = 12$ mm und einer geringen Schlankheit von 2,5, bei der kein Fließgelenk im Stabdübel entsteht, bestätigen Gehri's [3] Ansatz. Es kann gezeigt werden, dass der Abstand zum belasteten Rand für den ersten Anriss keinen Einfluss hat. Daraus ergibt sich, dass das Vorholz und damit der Volumeneffekt für den Anriss irrelevant sind, dieser Effekt hat jedoch einen Einfluss auf die maximale Kraft bis zum plötzlichen Versagen der gesamten Verbindung. Die Anrisslast kann um das 2 ÷ 3-fache erhöht werden, bis die maximale Kraft erreicht wird. Eine Auslegung der Tragfähigkeit anhand der Anrisslast sollte daher kritisch hinterfragt werden, da nach dem Erreichen des Anrisses noch große Laststeigerungen bis zum Versagen der Konstruktion erreicht werden können. Für alle Versuche mit größeren Seitenholz-Schlankheiten, also sobald ein Fließgelenk im Stabdübel entsteht, kann Gehri's [3] Ansatz weder bestätigt noch widerlegt werden. Es müssen noch weitere Untersuchungen erfolgen, bei denen der Anriss eindeutig bestimmt werden kann. Bei Untersuchungen mit drei Stabdübeln kann aus den Ergebnissen aufgrund zu hoher Streuung keine Aussage über den optimalen Zwischenabstand getätigt werden. Anzumerken ist, dass nicht die 3-fache Last im Vergleich zu den Versuchen mit einem Stabdübel (bei sonst identen Rahmenbedingungen) erbracht werden konnte.

Aus den Untersuchungen können die in Kapitel 2-5 gestellten Forschungsfragen wie folgt beantwortet werden:

- a) Wie kann der erste Anriss messtechnisch eindeutig erfasst werden?

Für einen Stabdübel der kein Fließmoment bildet (Schlankheit 2,5) trifft dies zu. Für Verbindungen mit mehreren Stabdübeln bzw. bei einer Fließgelenksbildung im Stabdübel sind noch verbesserte Messansätze nötig.

- b) Ist für eine querbeanspruchte Stabdübelverbindung die Lage des Stabdüfels in Bezug auf die Querschnittshöhe relevant?

Die Untersuchungen zeigen, dass die Lage des Stabdüfels irrelevant ist. Für Verbindungen mit einer Fließgelenksbildung konnte zu dieser Frage jedoch keine abgesicherte Aussage getroffen werden.

- c) Wie wirken sich die verschiedenen Parameter (Schlankheit, Durchmesser, Abstand zum belasteten Rand, Zwischenabstand) auf die Anrisslast aus?

Folgende Einflüsse der verschiedenen Parameter auf die Anrisslast konnten festgestellt werden:

Bei einer größeren Schlankheit kann tendenziell eine größere Anrisslast erreicht werden. Das resultiert allerdings nur aus der größeren Lochleibungsfläche, bezogen auf die Fläche kann aufgrund der Fließgelenkbildung und der daraus entstehenden ungleichmäßigen Belastung nur ein geringerer $f_{h,Riss}$ -Wert erreicht werden. Für querbeanspruchte Stabdübelverbindungen sollte somit, sofern Gehri's [3] Ansatz angewendet und das Stahlblech verlagert wird, Versagensmodus 1 (ohne Fließgelenksbildung) angestrebt werden.

Bei einem größeren Durchmesser kann eine größere Anrisslast erreicht werden, in der ermittelten Funktion ist der Durchmesser mit einer Potenz von 2,0 enthalten.

Der Abstand zum beanspruchten Rand $a_{4,t}$ hat keinen Einfluss auf die Anrisslast, sofern im Stabdübel kein Fließgelenk entsteht. Bei einer Fließgelenkbildung kann diese Aussage nicht abgesichert beurteilt werden.

Der Zwischenabstand a_1 kann nicht in Zusammenhang mit der Größe der Anrisslast gebracht werden.

- d) Kann das Tragverhalten einer querbeanspruchten Stabdübelverbindung in Birkenholz mit nur einer Formel mit einem noch zu bestimmenden Faktor dargestellt werden?

In Anlehnung an Gehri's [3] Formel (siehe Abbildung 2-25) wurde aus den Serien B6-1, B1-4 und B6-2 eine Funktion entwickelt, die die Anrisslast in Abhängigkeit des Stabdübel-Durchmessers wiedergibt (siehe Kapitel 4-2.2.1). Zu beachten ist dabei, dass die Funktion aus den Werten von drei Serien und somit insgesamt aus nur 30 Prüfkörpern abgeleitet worden ist.

$$F_{\text{riss}} = 0,08 \cdot d^{2,0} \quad (1.66)$$

F_{riss} Anrisslast [kN]
 d Durchmesser [mm]

5-1.2 EMPFEHLUNGEN FÜR ZUKÜNFTIGE FORSCHUNGEN

Es bleiben noch viele Fragen in Bezug auf das Verhalten von Stabdübel-Verbindungen quer zur Faser in Birkenholz offen. Die Funktion der Anrisslast in Abhängigkeit des Stabdübel-Durchmessers sollte überprüft und durch einen größeren Umfang der Versuche gestützt werden, dabei sollte auch eine größere Auswahl an Durchmessern miteinbezogen werden. Es sollte ein möglicher Einfluss der Holzfeuchte und der Rohdichte auf die Anrisslast untersucht werden. Gehri's [3] Funktion ergibt mehr als doppelt so hohe Werte, diese Differenz der Werte müsste noch durch weitere Versuche untersucht werden. Für die Maximalkraft sollte ein Grenzwert bezüglich des Abstandes zum belasteten Rand ermittelt werden, ab dem kein Einfluss mehr bemerkbar ist.

Für größere Schlankheiten, wo ein Fließgelenk erwartet wird, muss ein neues Konzept zur genauen messtechnischen Bestimmung des Anrisses überlegt werden. Wichtig ist dabei, den ersten Anriss gut aus den Messdaten zu erkennen. Wenn die Anrisslast bei einer Fließgelenk-Bildung bestimmt werden kann, sollte Gehri's [3] Ansatz bezüglich der lokalen Holzeigenschaften nochmals überprüft werden.

Bei nachfolgenden Untersuchungen mit mehreren Stabdübeln sollte ein besonderes Augenmerk auf ein spannungsfreies Einbringen aller Stabdübel sowie eine gleichmäßig verteilte Lasteinbringung während des Prüfungsvorgangs erfolgen. Die Anzahl der Versuche je Serie sollte größer gewählt werden, es sollten hierfür mindestens 10 Versuche je Serie geführt werden. In einer FE-Studie könnte untersucht werden, warum in den experimentellen Versuchen bei größerem Zwischenabstand $a_{4,t}$ der Verschiebungsmodul K_{ser} tendenziell geringer wird.

ANHANG A LITERATURVERZEICHNIS

- [1] „ÖNORM B 1995-1-1:2019,“ Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2019.
- [2] K. Johansen, „Theory of timber connections,“ *International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE Journal 9*, pp. S. 249-262, 1949.
- [3] E. Gehri, „Vorschlag für ergänzende Untersuchungen - Richtschnur Prüfprogramm TU Graz,“ unveröffentlicht, Rüşchlikon, 2019.
- [4] V. Krackler, D. Keunecke und P. Niemz, „Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz und Laubholzresten - Projektstudie,“ Institut für Baustoffe, ETH Zürich, Zürich, 2010.
- [5] U. Hübner, „Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, Graz, 2013.
- [6] U. Hübner, T. Bogensperger und G. Schickhofer, „Embedding Strength of European Hardwoods,“ CIB-W18, Paper 41-7-6, Canada, 2008.
- [7] B. Eckerstorfer, „Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Stahlblech-Holz-Stabdübelverbindungen in BirkenBrettschichtholz bei faserparalleler Beanspruchung,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, Graz, 2020.
- [8] S. Günther, „Langzeit-Monitoring von Wandaufbauten in Holz-Massivbauweise im Wohnbau " _massive_living" in Graz,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, Graz, 2015.
- [9] J. Hohenwarter, „Vergleich der Lochleibungsfestigkeit in Folge von Zug- und Druckbelastung,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, Graz, 2014.
- [10] G. Jeitler und M. Augustin, „Ist Birke die bessere Buche?,“ Internationales Holzbau-Forum, Graz, 2016.
- [11] „Zwischenauswertung der ÖWI 2016/18 - Bund,“ Bundesforschungszentrum für Wald, Wien, 2019.
- [12] „Pollmeier - BauBuche,“ [Online]. Available: <https://www.pollmeier.com/de/produkte/ueberbaubuche>. [Zugriff am 16 März 2020].
- [13] „The Russian Federation Forest Sector, Outlook Study to 2030,“ Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2012.
- [14] „Swedish forestry,“ Swedish Forest Industries Federation, Stockholm, 2012.
- [15] „Finnland: Europas waldreichstes Land,“ [Online]. Available: <http://www.metla.fi/suomenmetsat/index-de.htm>. [Zugriff am 31 Oktober 2019].
- [16] „About Forestry in Northern European countries,“ [Online]. Available: <http://noltfox.metla.fi/nordic.htm>. [Zugriff am 31 Oktober 2019].
- [17] Estonia Ministry of the Environment, „Forest Research in the North,“ *Scandinavian Journal of Forest Research, News & Views No. 1*, 2004.
- [18] V. Araminiene und I. Varnagiryte-Kabasinskiene, „Research on Birch Species in Lithuania: a Review Study,“ Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry, 2014.

- [19] „WKÖ - Statistik, Fläche und Benützungsarten,“ WKÖ Statistik, Wien, 2018.
- [20] Obernosterer, David;, „Produkte aus Birke für Tragstrukturen des konstruktiven Holzbaus,“ Hasslacher Norica Timber, 2018.
- [21] A. Ringhofer und G. Schickhofer, „Timber-in-Town - current examples for residential buildings in CLT and tasks for the future,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, Graz, 2013.
- [22] G. Jeitler, „NORITEC wächst mit dem weltweit ersten Haus in Birke-Brettspertholz über sich hinaus,“ Hasslacher Norica Timber; Mitarbeiterjournal Nr. 10, 2014.
- [23] „Hasslacher Norica Timber - Industriehalle in Stall,“ [Online]. Available: <https://www.hasslacher.com/industrie-halle-stall>. [Zugriff am 31 März 2020].
- [24] G. Neroth und D. Vollenschaar, Wendehorst Baustoffkunde 27. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [25] A. Stuefer, „Einflussparameter auf die Querkzugfestigkeit von BSH-Lamellen,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, Graz, 2011.
- [26] G. Holzmann, M. Wangelin und R. Bruns, Natürliche und pflanzliche Baustoffe, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.
- [27] „Dreamstime.com,“ [Online]. Available: <https://www.dreamstime.com/royalty-free-stock-photo-silver-birch-white-background-isolated-image39942855>. [Zugriff am 16 März 2020].
- [28] „Proholz - Holzarten - Birke,“ [Online]. Available: <http://www.proholz.at/holzarten/birke/>. [Zugriff am 21 Oktober 2019].
- [29] H. Dummer, M. Pölzer und G. Münster, „Die Birke - Der Baum des Jahres 2009,“ Kuratorium Wald, [Online]. Available: <https://www.himmel.at/kuratorium-wald/projekte/baum-des-jahres/2009-die-birke/>. [Zugriff am 21 Oktober 2019].
- [30] „Nordic Forestry,“ [Online]. Available: <http://www.nordicforestry.org/page/nordic-family-forestry>. [Zugriff am 21 Oktober 2019].
- [31] J. Fellner, A. Teischinger und W. Zschokke, „Holzspektrum - Ansichten, Beschreibungen und Vergleichswerte,“ proholz Austria, Wien, 2006.
- [32] „ÖNORM EN 14080:2013,“ Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2013.
- [33] G. Schickhofer, „Skriptum Holzbau - Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie; TU Graz, Graz, 2009.
- [34] A. Meisel, „Skriptum Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen, Zimmermannsmäßige Verbindungen,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, Graz, 2019.
- [35] G. Schickhofer, „Formelsammlung Holzbau,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie; TU Graz, Graz, 2016.
- [36] A. Mischler, „Bedeutung der Duktilität für das Tragverhalten von Stahl-Holz-Bolzenverbindungen,“ ETH Zürich, 1998.
- [37] „ÖNORM EN 409:2009,“ Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2009.
- [38] „ÖNORM EN 338:2016,“ Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2016.

- [39] „Technisches Merkblatt Prefere - 4546 flüssiger Melaminharzkleber für den Holzleimbau,“ dynea, 2012.
- [40] U. P. H. Unterweger, „Skriptum Stahlbau Grundlagen,“ Institut für Stahlbau, TU Graz, Graz, 2016.
- [41] T. Krapfenbauer, Bau-Tabellen 20. Ausgabe, Wien: Jugend & Volk, 2016.
- [42] A. Kovryga, P. Stapel und J. W. v. d. Kuilen, „INTER, International Network on Timber Engineering Research, Meeting 49,“ in *Tensile strength classes for hardwoods*, Graz, 2016.
- [43] K. Ganster, „VO Holzhochbauten - Skript Grundlagen der Bauphysik,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, Graz, 2017.
- [44] „ÖNORM EN 13183-1:2004,“ Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2004.
- [45] „ÖNORM EN 384:2019,“ Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2019.
- [46] „ÖNORM EN 26 891:1991,“ Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 1991.

ANHANG B DIVERSE ANDERE ANHÄNGE

B-1 Prüfungsergebnisse

Tabelle 5-1: Übersicht der Ergebnisse für jeden Prüfkörper

Name	d	λ	n	a_1	Lage	F_{riss}	F_{max}	Zeit bis F_{max}	K_{ser}	Corr K_{ser}	Holzfeuchte	Rohdichte bei 12%	$K_{ser,EC}$	f_{riss}
[-]	[mm]	[d]	[stk]	[d]	[-]	[N]	[N]	[sec]	[N/mm]	[-]	[%]	[kg/m ³]	[N/mm]	[N/mm ²]
B1-4-01	12	2,5	1		mittig	8337,08	30921	725	27681	0,999932	8,92	581	29213	11,58
B1-4-02	12	2,5	1		mittig	9364,51	27797	531	29997	0,999903	9,43	575	28771	13,01
B1-4-03	12	2,5	1		mittig	11036,45	27172	466	29160	0,999938	9,58	570	28431	15,33
B1-4-04	12	2,5	1		mittig	9595,73	30024	650	22104	0,999928	8,79	587	29703	13,33
B1-4-05	12	2,5	1		mittig	12406,68	34431	606	29994	0,999946	8,66	609	31365	17,23
B1-4-06	12	2,5	1		mittig	11601,24	33236	789	25694	0,999925	9,57	616	31903	16,11
B1-4-07	12	2,5	1		mittig	9618,62	31496	715	25169	0,999947	8,72	612	31628	13,36
B1-4-08	12	2,5	1		mittig	12257,96	28252	452	27672	0,999933	9,57	620	32214	17,02
B1-4-09	12	2,5	1		mittig	8910,85	34242	911	21428	0,999917	8,81	637	33586	12,38
B1-4-10	12	2,5	1		mittig	14366,09	35245	851	26770	0,999903	9,30	621	32264	19,95
B1-4-11	12	2,5	1		mittig	10437,16	28331	559	20150	0,999916	9,24	624	32531	14,50
B1-1-01	12	2,5	1		oben	8501,52	10392	45	32293	0,999918	9,01	585	29523	11,81
B1-1-02	12	2,5	1		oben	10844,58	15807	310	31779	0,999961	9,43	753	43157	15,06
B1-1-03	12	2,5	1		oben	11897,82	13948	329	27415	0,999902	8,65	509	23941	16,52
B1-1-04	12	2,5	1		oben	11815,85	18340	492	32926	0,999902	9,27	715	39888	16,41
B1-1-05	12	2,5	1		oben	12517,75	17567	429	36417	0,999905	9,26	654	34942	17,39
B1-1-06	12	2,5	1		oben	9836,25	12110	317	30208	0,999901	10,57	598	30553	13,66
B1-1-07	12	2,5	1		oben	7378,05	12177	536	16853	0,999913	9,43	605	31032	10,25
B1-1-08	12	2,5	1		oben	11533,73	13596	405	26813	0,999902	9,38	601	30752	16,02
B1-1-09	12	2,5	1		oben	11195,26	12936	419	22016	0,999959	8,88	542	26310	15,55
B1-1-10	12	2,5	1		oben	8895,48	13405	369	22110	0,999990	8,16	555	27276	12,35
B1-7-01	12	2,5	1		unten	11261,96	39898	1306	21974	0,999918	9,14	664	35745	15,64
B1-7-02	12	2,5	1		unten	10329,25	30840	329	21922	0,999942	9,03	586	29595	14,35
B1-7-03	12	2,5	1		unten	4327,62	23290	328	17839	0,999904	9,18	577	28899	6,01
B1-7-04	12	2,5	1		unten	11499,22	22745	342	15217	0,999918	8,97	501	23437	15,97
B1-7-05	12	2,5	1		unten	11835,83	31617	323	24284	0,999931	9,48	673	36474	16,44

B1-7-06	12	2,5	1		unten	15854,70	31152	328	24396	0,999970	10,10	677	36797	22,02
B1-7-07	12	2,5	1		unten	10319,52	27770	319	20178	0,999938	8,89	603	30907	14,33
B1-7-08	12	2,5	1		unten	8725,80	22184	323	17462	0,999900	9,42	509	23979	12,12
B1-7-09	12	2,5	1		unten	11362,87	25417	335	22163	0,999945	9,18	548	26757	15,78
B1-7-10	12	2,5	1		unten	5262,73	25130	326	20379	0,999911	8,48	592	30052	7,31
B1-2-01	12	5,0	1		oben	6341,31	24330	819	30353	0,999900	8,95	563	27896	4,40
B1-2-02	12	5,0	1		oben	13329,79	24978	328	38082	0,999911	9,89	709	39409	9,26
B1-2-03	12	5,0	1		oben	12665,61	26976	352	35105	0,999921	9,75	600	30645	8,80
B1-2-04	12	5,0	1		oben	12475,00	24831	352	28852	0,999908	8,67	567	28212	8,66
B1-2-05	12	5,0	1		oben	7030,54	26581	415	29647	0,999919	9,51	616	31925	4,88
B1-2-06	12	5,0	1		oben	12634,49	29100	889	23347	0,999907	8,96	548	26763	8,77
B1-2-07	12	5,0	1		oben	9772,70	26579	357	36777	0,999901	9,13	629	32940	6,79
B1-2-08	12	5,0	1		oben	11299,15	24163	283	34063	0,999911	9,70	578	28992	7,85
B1-2-09	12	5,0	1		oben	10510,02	28441	417	33804	0,999912	9,23	603	30922	7,30
B1-2-10	12	5,0	1		oben	10248,52	25306	390	32552	0,999909	9,38	550	26907	7,12
B1-5-01	12	5,0	1		mittig	16656,42	39396	409	28050	0,999913	9,19	652	34781	11,57
B1-5-02	12	5,0	1		mittig	18724,96	40056	303	34597	0,999919	9,30	657	35156	13,00
B1-5-03	12	5,0	1		mittig	17709,50	37747	262	35926	0,999944	8,61	606	31169	12,30
B1-5-04	12	5,0	1		mittig	12182,47	31904	270	23361	0,999900	9,17	605	31087	8,46
B1-5-05	12	5,0	1		mittig	18023,97	30223	260	31758	0,999938	9,88	569	28300	12,52
B1-5-06	12	5,0	1		mittig	11761,67	30584	258	28401	0,999911	9,56	601	30770	8,17
B1-5-07	12	5,0	1		mittig	10728,28	28980	261	28481	0,999922	8,77	527	25281	7,45
B1-5-08	12	5,0	1		mittig	16440,61	36305	264	37067	0,999947	9,33	642	33946	11,42
B1-5-09	12	5,0	1		mittig	16074,03	30162	263	28810	0,999911	8,74	590	29886	11,16
B1-5-10	12	5,0	1		mittig	6579,53	37862	307	27023	0,999919	9,42	573	28604	4,57
B1-8-01	12	5,0	1		unten	11687,01	23641	265	21582	0,999912	10,01	549	26853	8,12
B1-8-02	12	5,0	1		unten	13976,11	34024	265	29631	0,999939	9,74	646	34248	9,71
B1-8-03	12	5,0	1		unten	21325,68	35187	270	31876	0,999916	9,43	642	33921	14,81
B1-8-04	12	5,0	1		unten	14839,31	28977	263	25419	0,999906	9,59	606	31099	10,31
B1-8-05	12	5,0	1		unten	19391,01	36075	274	30044	0,999913	9,90	688	37674	13,47
B1-8-06	12	5,0	1		unten	7917,06	33211	281	24043	0,999904	9,14	623	32419	5,50
B1-8-07	12	5,0	1		unten	11414,18	25088	277	25475	0,999953	9,12	536	25866	7,93
B1-8-08	12	5,0	1		unten	12976,77	36739	278	29248	0,999931	9,05	648	34448	9,01

B1-8-09	12	5,0	1		unten	12612,85	33460	286	28238	0,999932	9,30	616	31928	8,76
B1-8-10	12	5,0	1		unten	20543,19	37856	303	26383	0,999937	9,71	666	35901	14,27
B6-1-01	8	2,5	1		mittig	6733,03	17117	706	19543	0,999931	8,76	579	19397	21,04
B6-1-02	8	2,5	1		mittig	7059,10	15178	332	15899	0,999925	8,84	594	20130	22,06
B6-1-03	8	2,5	1		mittig	6803,37	13625	333	15428	0,999952	8,81	573	19092	21,26
B6-1-04	8	2,5	1		mittig	7962,90	13950	280	18207	0,999959	8,96	566	18714	24,88
B6-1-05	8	2,5	1		mittig	6981,58	15278	293	16774	0,999957	9,05	596	20237	21,82
B6-1-06	8	2,5	1		mittig	4380,80	15059	462	10021	0,999935	9,02	595	20172	13,69
B6-1-07	8	2,5	1		mittig	6007,79	17226	601	13392	0,999929	9,12	586	19727	18,77
B6-1-08	8	2,5	1		mittig	6852,62	17067	626	17874	0,999959	9,19	572	19022	21,41
B6-1-09	8	2,5	1		mittig	6664,62	17256	466	18810	0,999941	8,97	591	20000	20,83
B6-1-10	8	2,5	1		mittig	7699,57	16795	482	17764	0,999927	8,75	613	21098	24,06
B4-1-01	8	2,5	3	7	mittig	21018,88	27305	207	44851	0,999930	8,70	595	60620	21,89
B4-1-02	8	2,5	3	7	mittig	19990,45	28462	189	42580	0,999904	8,64	606	62228	20,82
B4-1-03	8	2,5	3	7	mittig	13793,65	22748	149	43080	0,999904	9,07	596	60780	14,37
B4-1-04	8	2,5	3	7	mittig	9583,45	22323	276	20994	0,999915	8,49	560	55289	9,98
B4-1-05	8	2,5	3	7	mittig	18016,58	26649	257	33498	0,999908	9,02	617	63984	18,77
B4-2-01	8	2,5	3	9	mittig	14590,56	34516	242	34945	0,999930	8,27	602	61632	15,20
B4-2-02	8	2,5	3	9	mittig									
B4-2-03	8	2,5	3	9	mittig	16375,72	25072	184	21808	0,999941	8,22	597	60944	17,06
B4-2-04	8	2,5	3	9	mittig	6391,25	32014	236	24525	0,999931	8,51	614	63552	6,66
B4-2-05	8	2,5	3	9	mittig	13634,22	27682	195	41388	0,999913	8,64	592	60109	14,20
B4-3-01	8	2,5	3	11	mittig	4134,38	22659	291	44658	0,999919	7,80	556	54656	4,31
B4-3-02	8	2,5	3	11	mittig	16229,65	26614	199	33808	0,999915	8,47	607	62448	16,91
B4-3-03	8	2,5	3	11	mittig	13839,14	29406	210	48998	0,999919	8,17	585	59049	14,42
B4-3-04	8	2,5	3	11	mittig	5917,71	30098	204	21355	0,999917	9,16	613	63416	6,16
B4-3-05	8	2,5	3	11	mittig	11089,98	29546	214	52117	0,999934	8,51	596	60772	11,55
B2-2-01	12	2,5	3	7	mittig	23910,05	47513	291	74981	0,999950	9,64	592	90182	11,07
B2-2-02	12	2,5	3	7	mittig	12921,32	44341	225	71084	0,999976	9,40	631	99295	5,98
B2-2-03	12	2,5	3	7	mittig	12131,16	37952	207	149063	0,999923	8,62	559	82695	5,62
B2-2-04	12	2,5	3	7	mittig	15529,61	56965	258	82954	0,999912	9,07	654	104734	7,19
B2-2-05	12	2,5	3	7	mittig	22121,73	45216	202	154352	0,999909	9,24	605	93234	10,24
B2-4-01	12	2,5	3	9	mittig	26334,08	49338	205	90449	0,999942	9,04	649	103515	12,19

B2-4-02	12	2,5	3	9	mittig	24225,11	40178	167	36675	0,999912	9,34	593	90417	11,22
B2-4-03	12	2,5	3	9	mittig	21080,35	61273	273	92347	0,999905	9,38	600	92077	9,76
B2-4-04	12	2,5	3	9	mittig	14188,25	60020	335	57190	0,999493	9,11	582	87811	6,57
B2-4-05	12	2,5	3	9	mittig	27201,82	49195	206	90958	0,998927	9,19	611	94452	12,59
B2-6-01	12	2,5	3	11	mittig	18090,21	58978	305	77066	0,999925	8,62	563	83611	8,38
B2-6-02	12	2,5	3	11	mittig	17127,90	63023	289	78138	0,999906	8,89	651	104048	7,93
B2-6-03	12	2,5	3	11	mittig	26776,55	68472	314	90168	0,999929	9,13	653	104479	12,40
B2-6-04	12	2,5	3	11	mittig	26049,93	60575	274	82135	0,999913	9,70	673	109262	12,06
B2-6-05	12	2,5	3	11	mittig	14360,75	46953	212	83930	0,999924	9,54	657	105370	6,65
B6-2-01	16	2,5	1		mittig	15309,63	40392	585	22139	0,999913	9,67	535	34445	11,96
B6-2-02	16	2,5	1		mittig	24576,04	60233	686	40628	0,999921	9,58	595	40395	19,20
B6-2-03	16	2,5	1		mittig	22375,79	57761	529	35496	0,999915	9,37	597	40629	17,48
B6-2-04	16	2,5	1		mittig	20307,31	58969	456	43894	0,999925	9,72	660	47148	15,87
B6-2-05	16	2,5	1		mittig	24982,93	59983	617	35443	0,999934	9,61	601	41034	19,52
B6-2-06	16	2,5	1		mittig	15652,42	51923	479	33922	0,999946	9,37	588	39669	12,23
B6-2-07	16	2,5	1		mittig	17821,30	58726	604	35087	0,999913	9,41	596	40490	13,92
B6-2-08	16	2,5	1		mittig	20452,32	62743	687	40923	0,999936	9,31	616	42533	15,98
B6-2-09	16	2,5	1		mittig	19263,33	47351	403	39270	0,999948	9,36	588	39718	15,05
B6-2-10	16	2,5	1		mittig	16689,74	55289	436	31664	0,999626	9,58	646	45663	13,04
B4-4-01	16	2,5	3	7	mittig	33931,69	97247	464	118762	0,999983	9,18	676	146881	8,84
B4-4-02	16	2,5	3	7	mittig	54723,18	89942	377	59131	0,999918	9,43	621	129127	14,25
B4-4-03	16	2,5	3	7	mittig	37921,59	92571	397	113218	0,999905	9,63	649	138038	9,88
B4-4-04	16	2,5	3	7	mittig	25741,02	88422	356	135119	0,999908	9,14	632	132547	6,70
B4-4-05	16	2,5	3	7	mittig	33275,48	90482	398	115682	0,999915	9,29	602	123337	8,67
B4-5-01	16	2,5	3	9	mittig	19080,09	87376	469	151102	0,999903	9,26	622	129452	4,97
B4-5-02	16	2,5	3	9	mittig	8493,90	89637	471	139069	0,999938	9,20	628	131489	2,21
B4-5-03	16	2,5	3	9	mittig	24179,35	108749	561	122972	0,999910	9,46	638	134564	6,30
B4-5-04	16	2,5	3	9	mittig	13137,89	107204	590	113874	0,999928	9,65	676	146763	3,42
B4-5-05	16	2,5	3	9	mittig	24765,04	106446	605	94185	0,999905	9,71	654	139482	6,45
B4-6-01	16	2,5	3	11	mittig	21427,43	77153	371	101476	0,999900	9,33	632	132627	5,58
B4-6-02	16	2,5	3	11	mittig	18973,75	115959	680	124347	0,999949	9,37	575	115170	4,94
B4-6-03	16	2,5	3	11	mittig	19020,87	91395	576	110609	0,999946	8,84	554	108786	4,95
B4-6-04	16	2,5	3	11	mittig	18969,62	103179	566	92253	0,999915	9,67	587	118808	4,94

B4-6-05	16	2,5	3	11	mittig	17247,28	132162	885	129808	0,999859	9,39	612	126352	4,49
---------	----	-----	---	----	--------	----------	--------	-----	--------	----------	------	-----	--------	------

B-2 Prüfaufbau Detailpläne

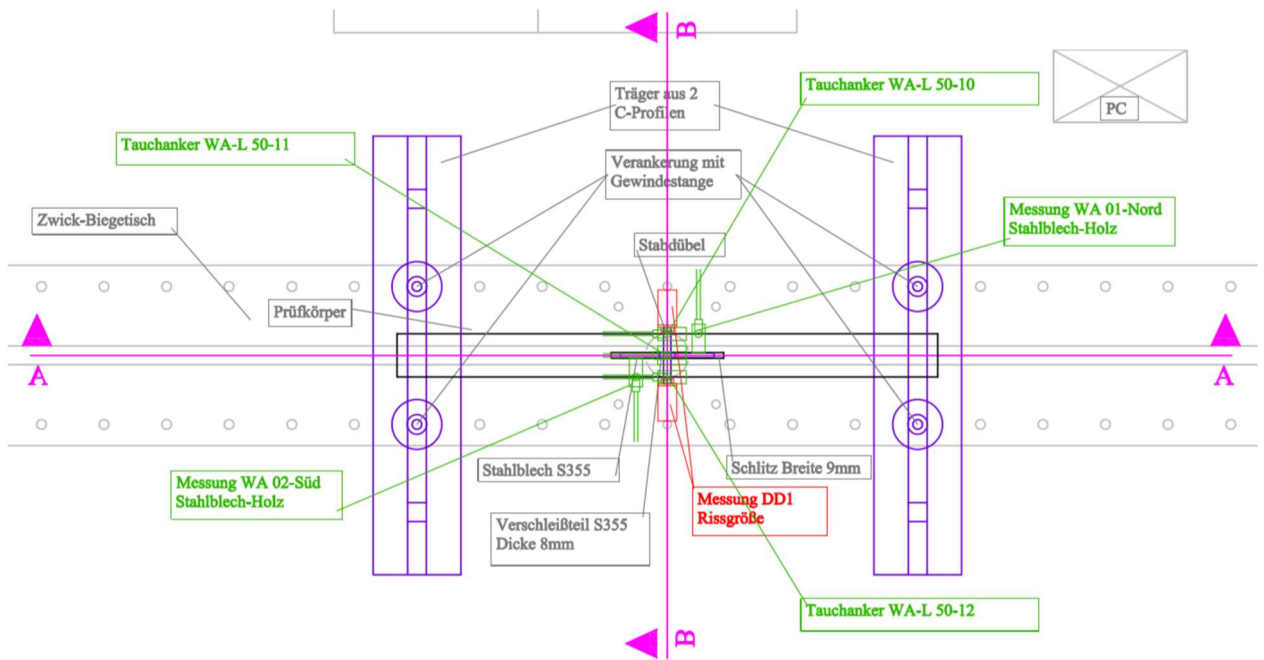


Abbildung 5-1: Grundriss Prüfaufbau

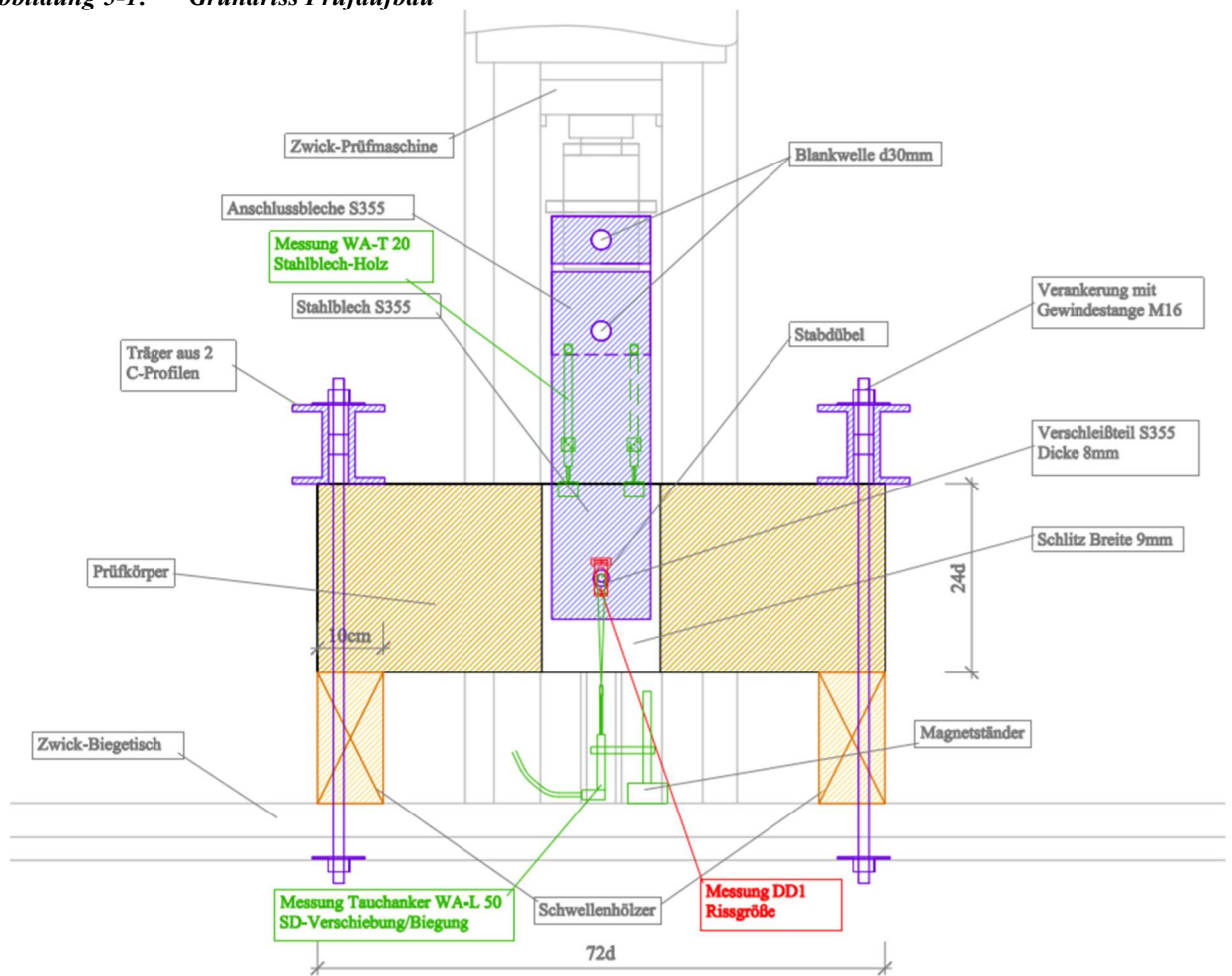


Abbildung 5-2: Schnitt A-A Prüfaufbau

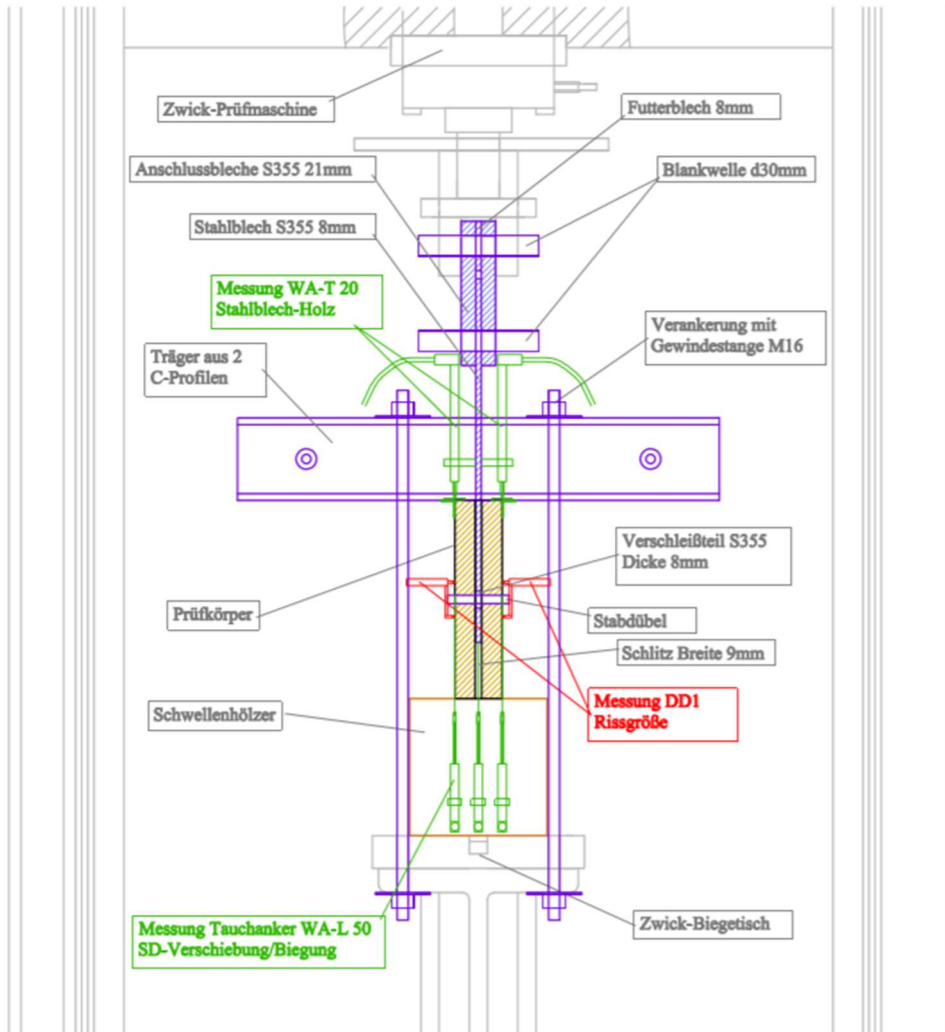
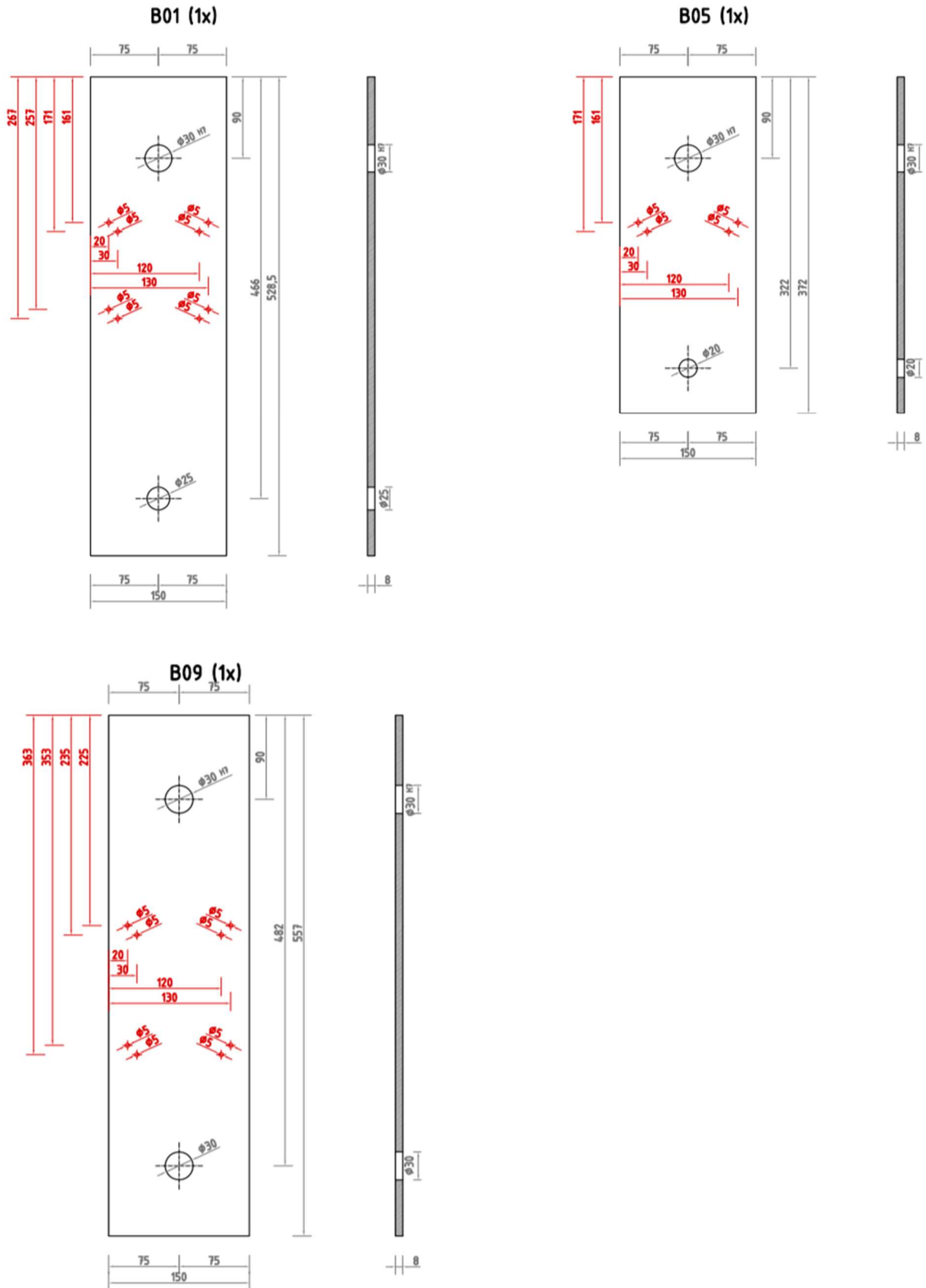
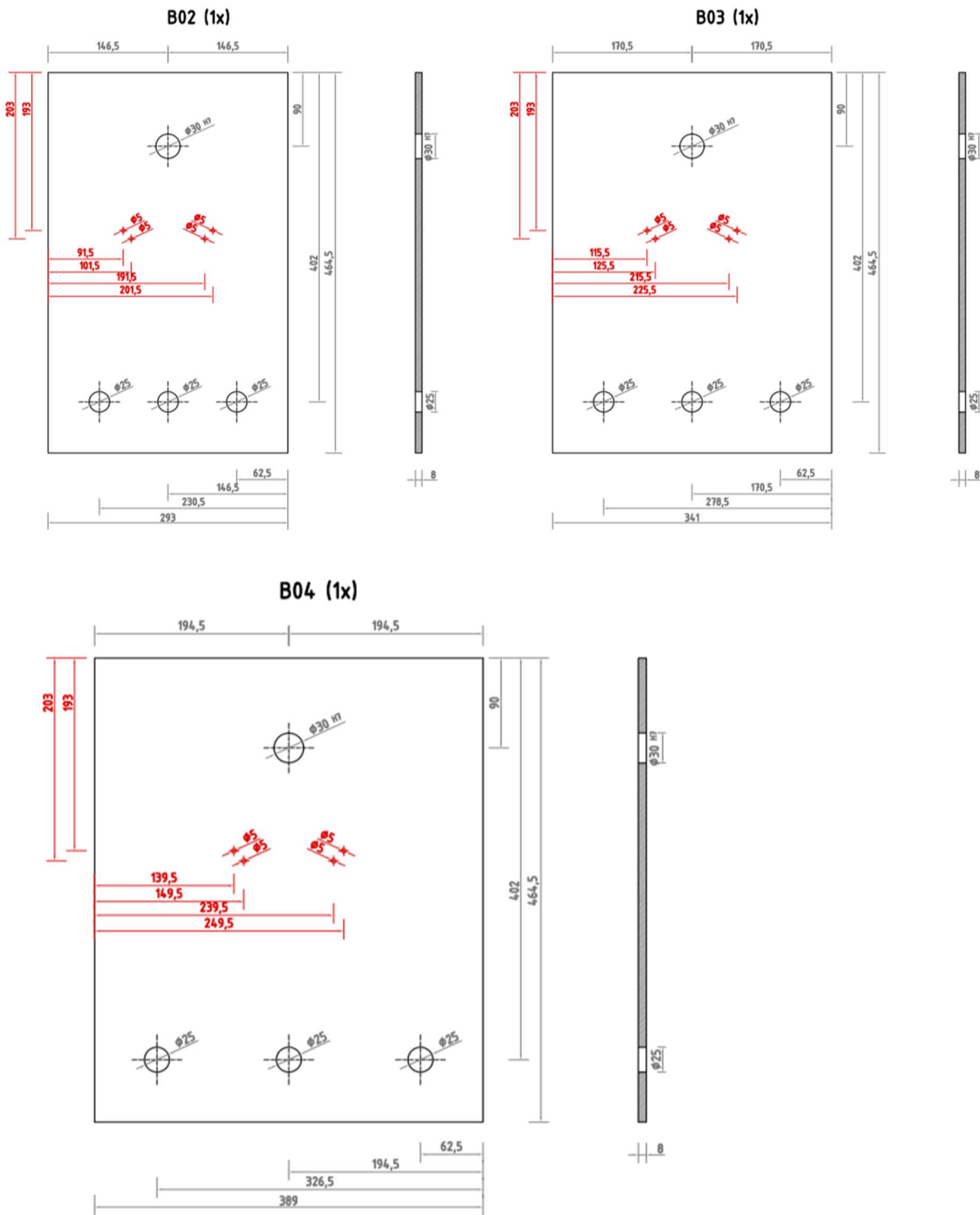


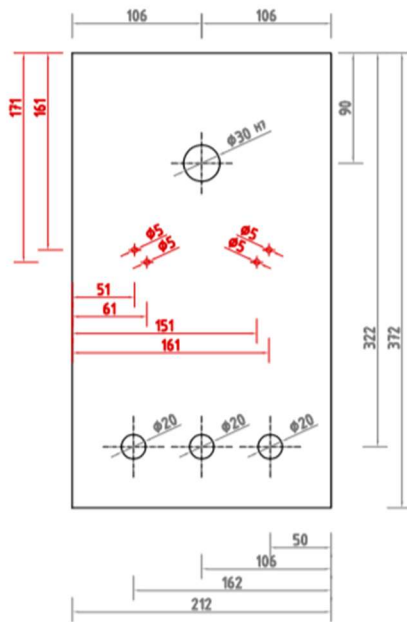
Abbildung 5-3: Schnitt B-B Prüfaufbau

B-3 Stahlteile Detailpläne

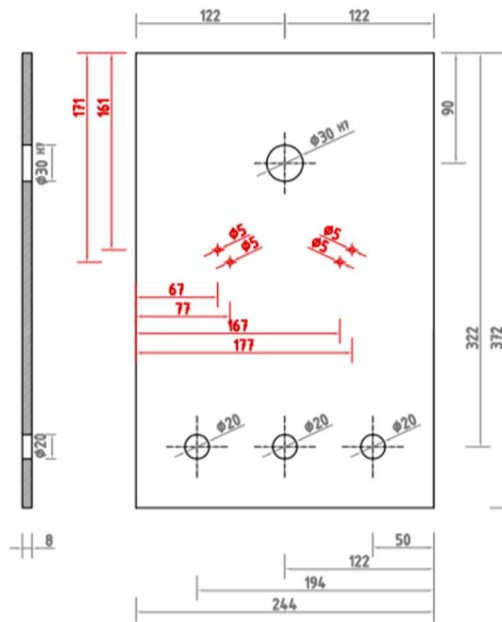




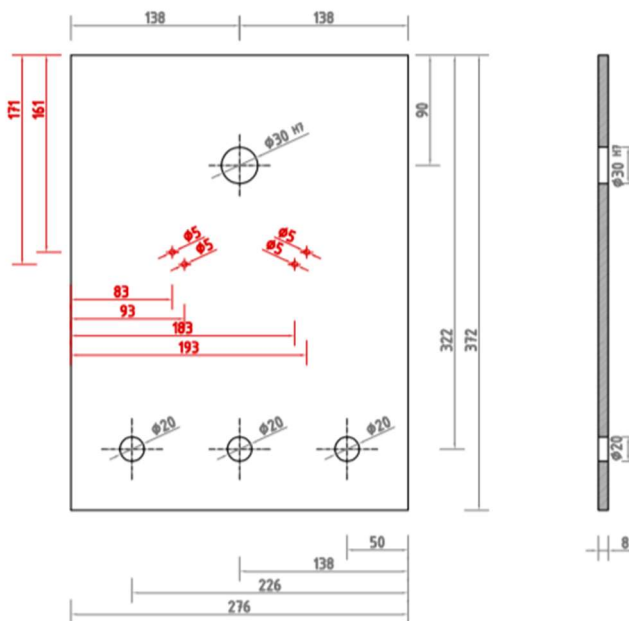
B06 (1x)

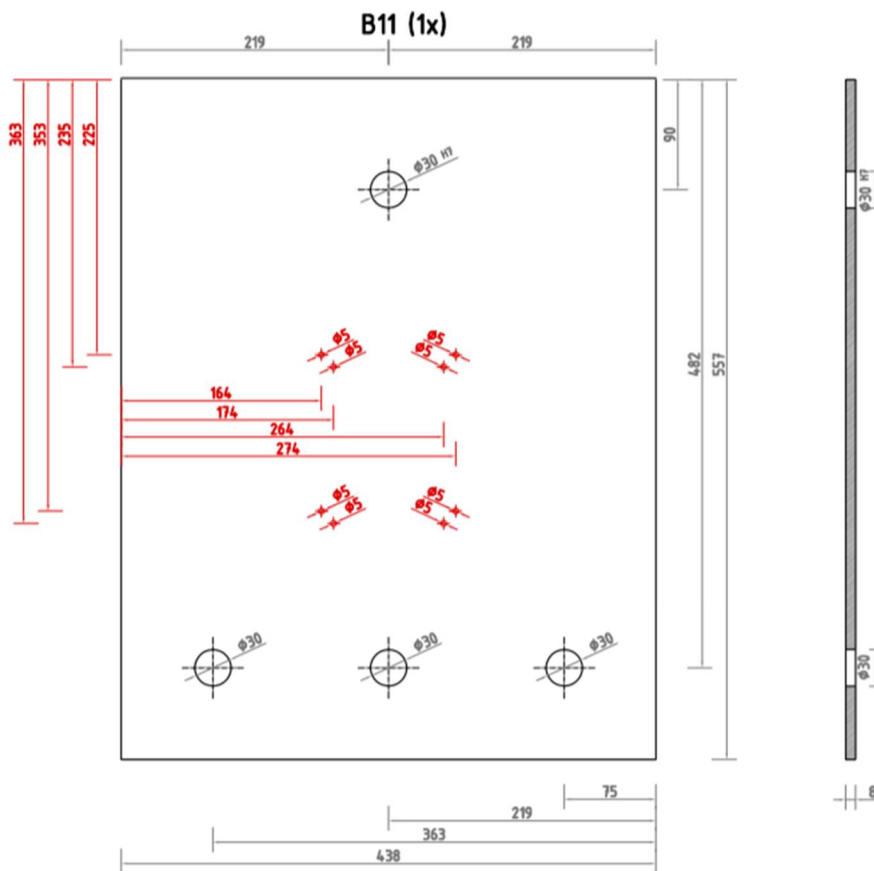
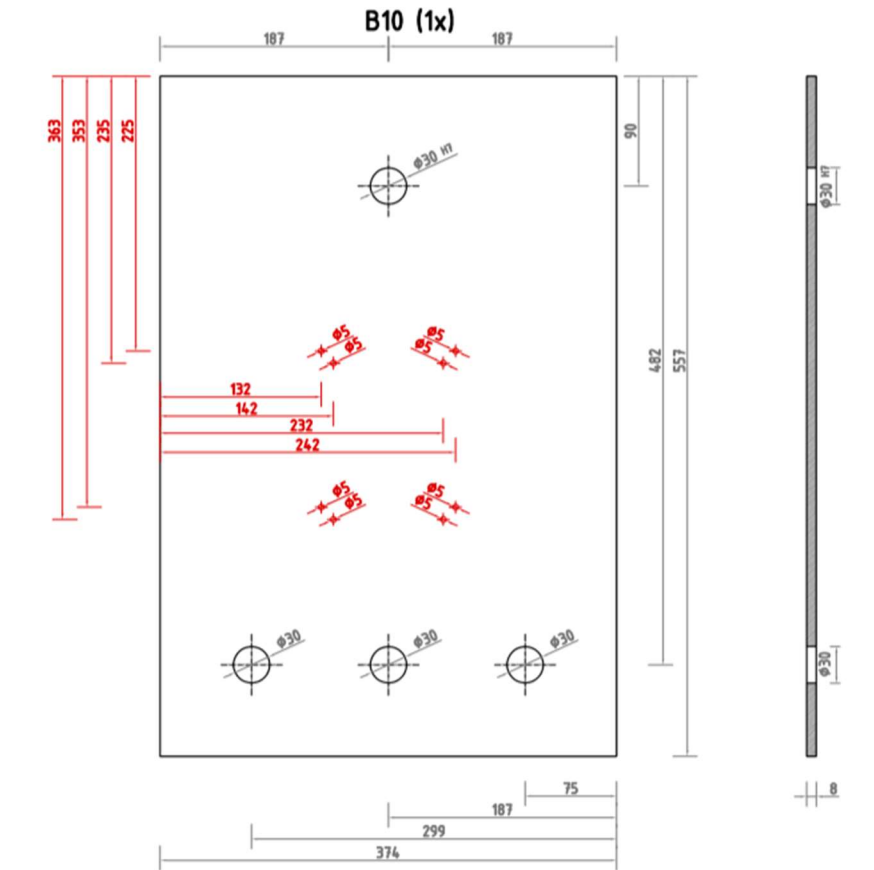


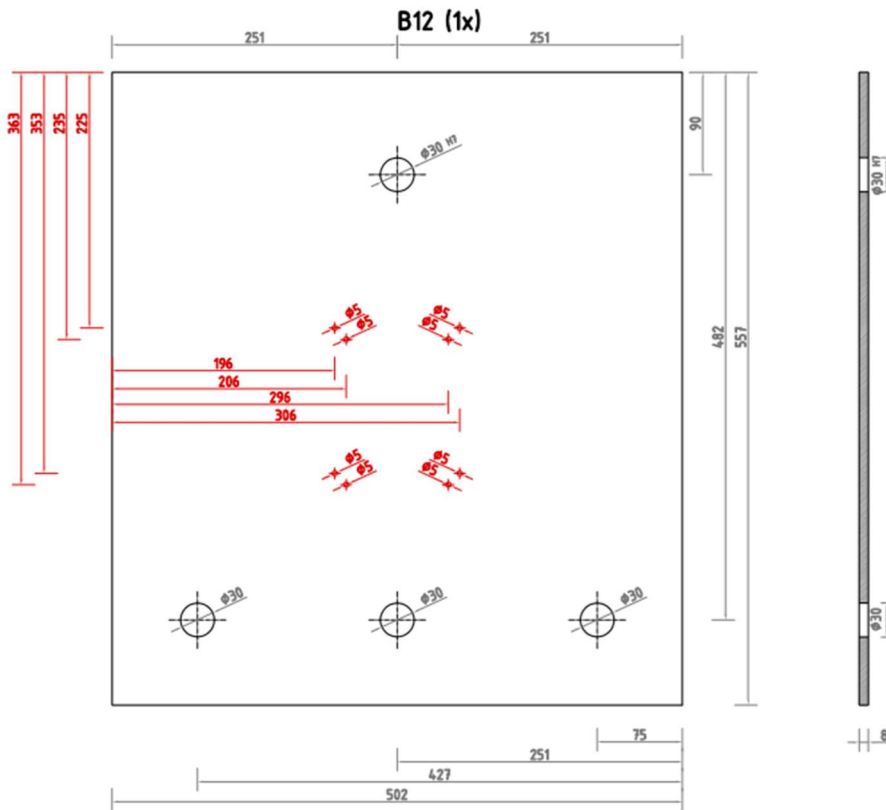
B07 (1x)



B08 (1x)







B-4 Kraft-Zeit-Diagramme je Serie

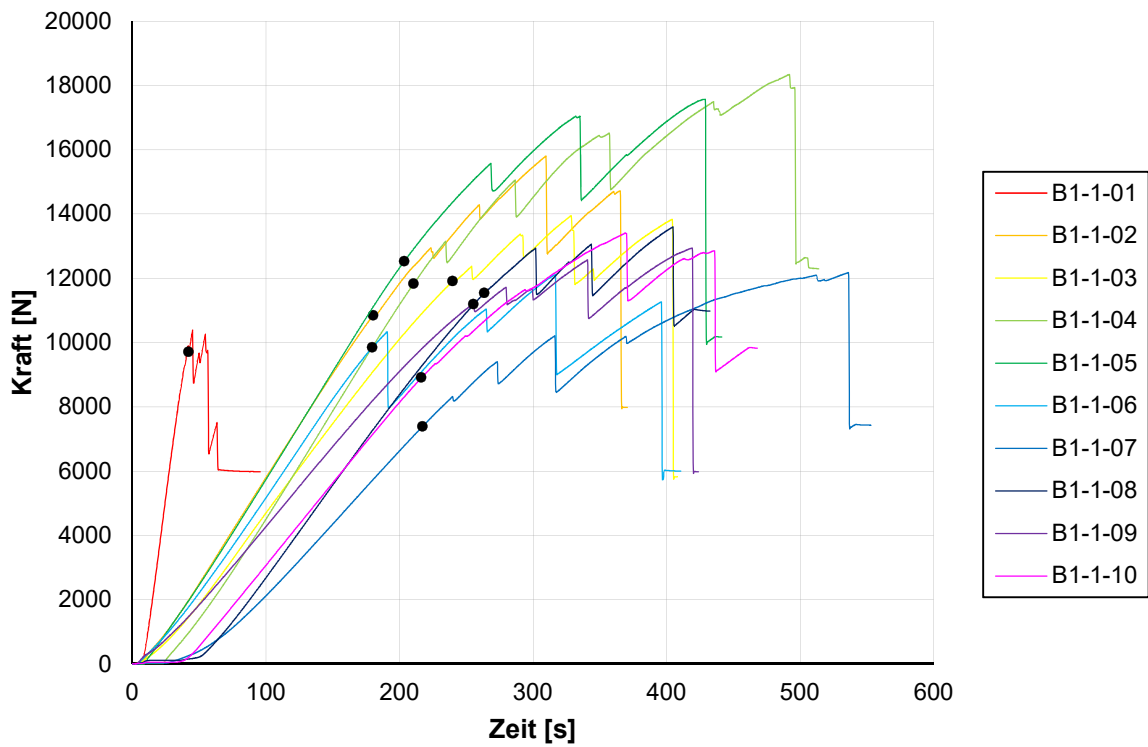


Abbildung 5-4: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B1-1

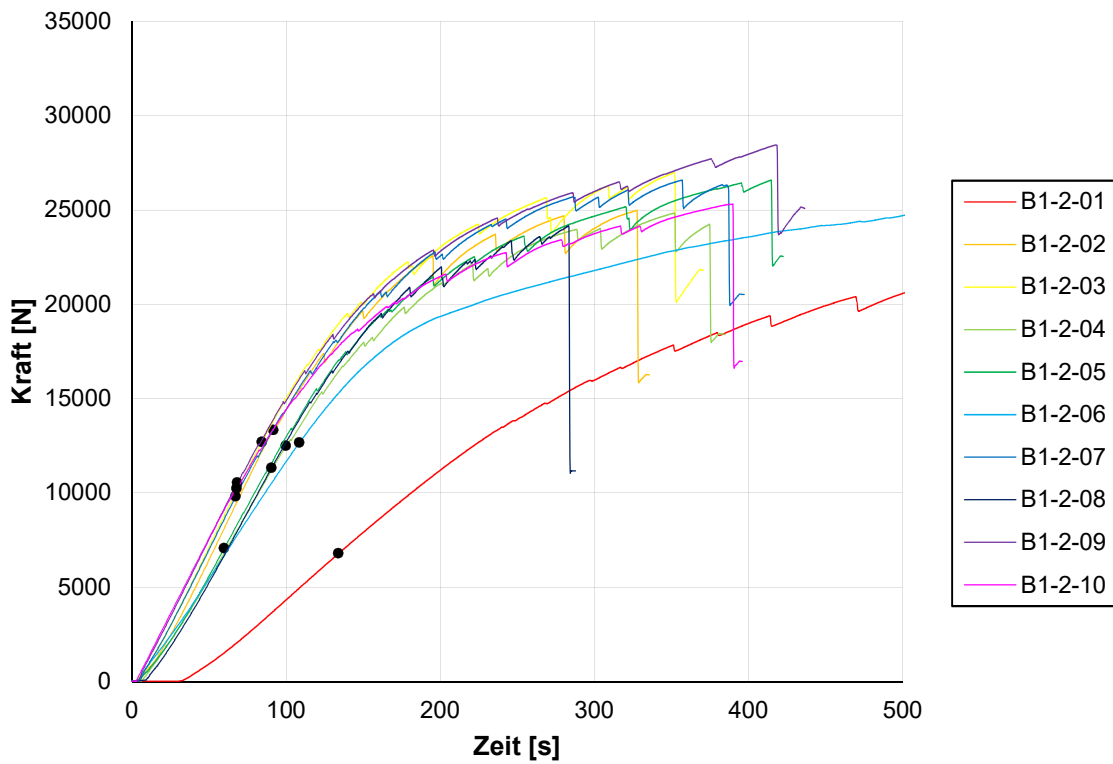


Abbildung 5-5: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B1-2

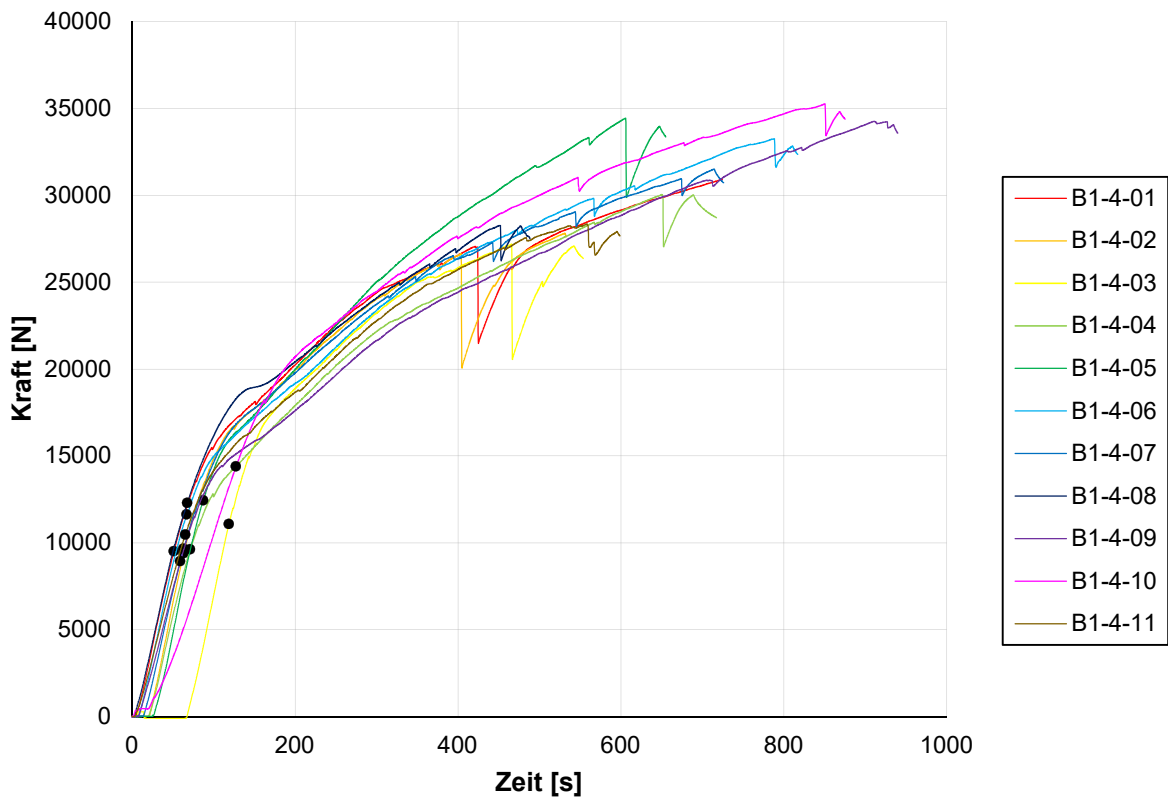


Abbildung 5-6: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B1-4

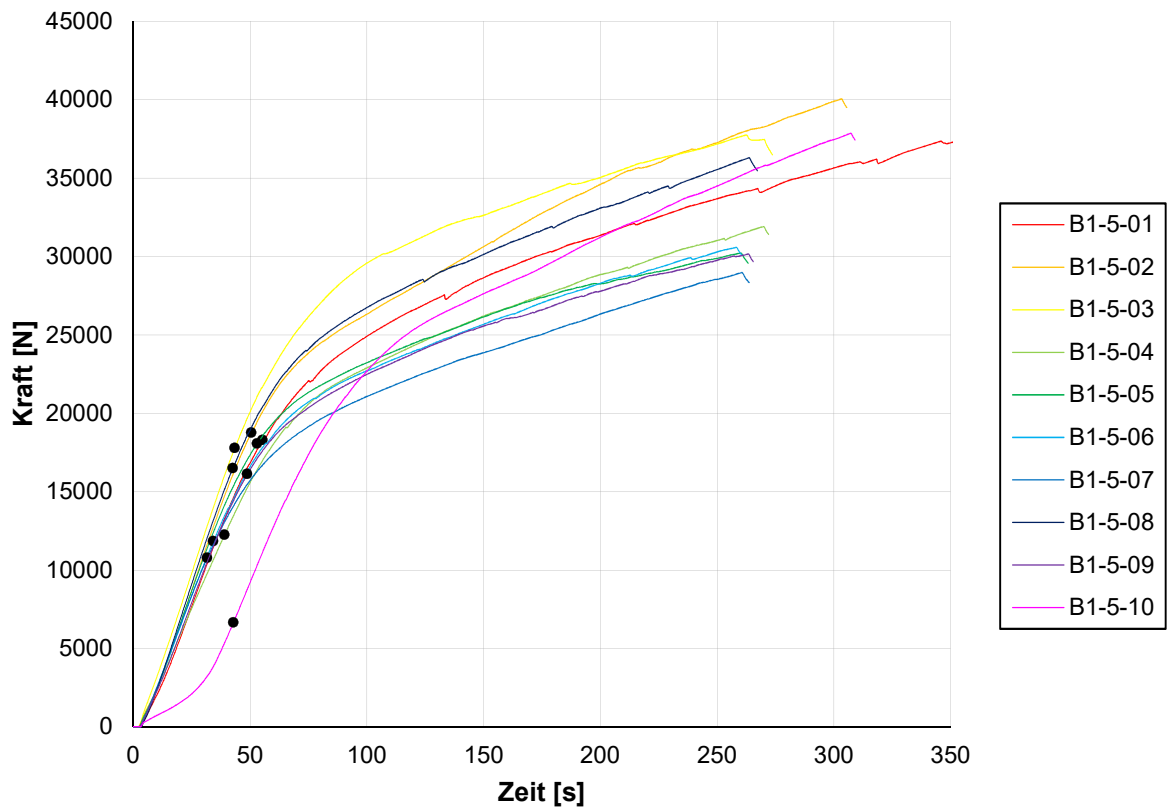


Abbildung 5-7: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B1-5

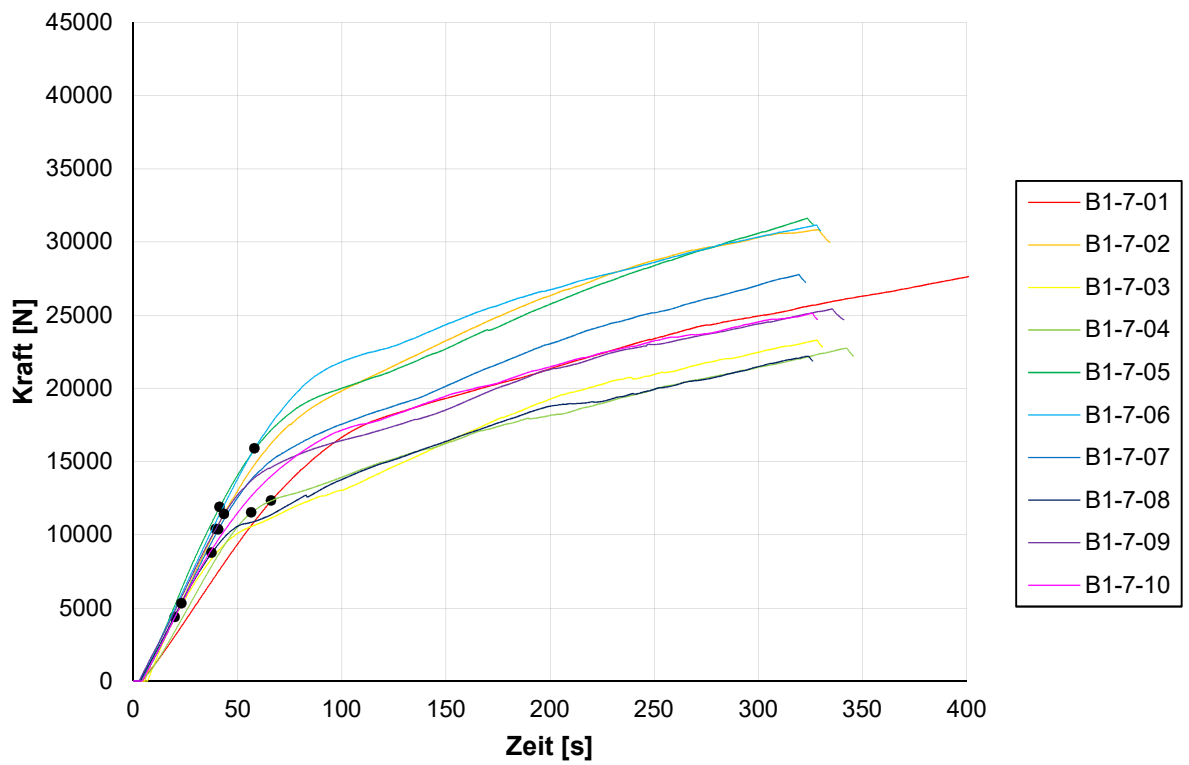


Abbildung 5-8: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B1-7

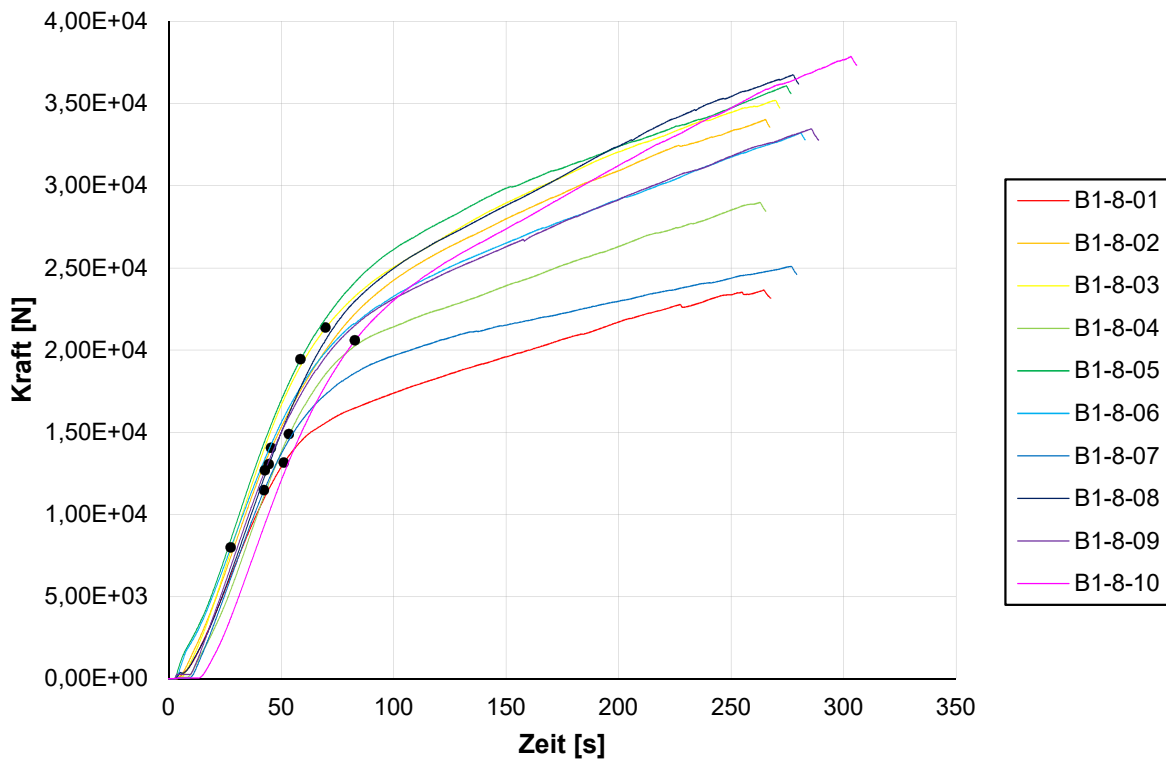


Abbildung 5-9: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B1-8

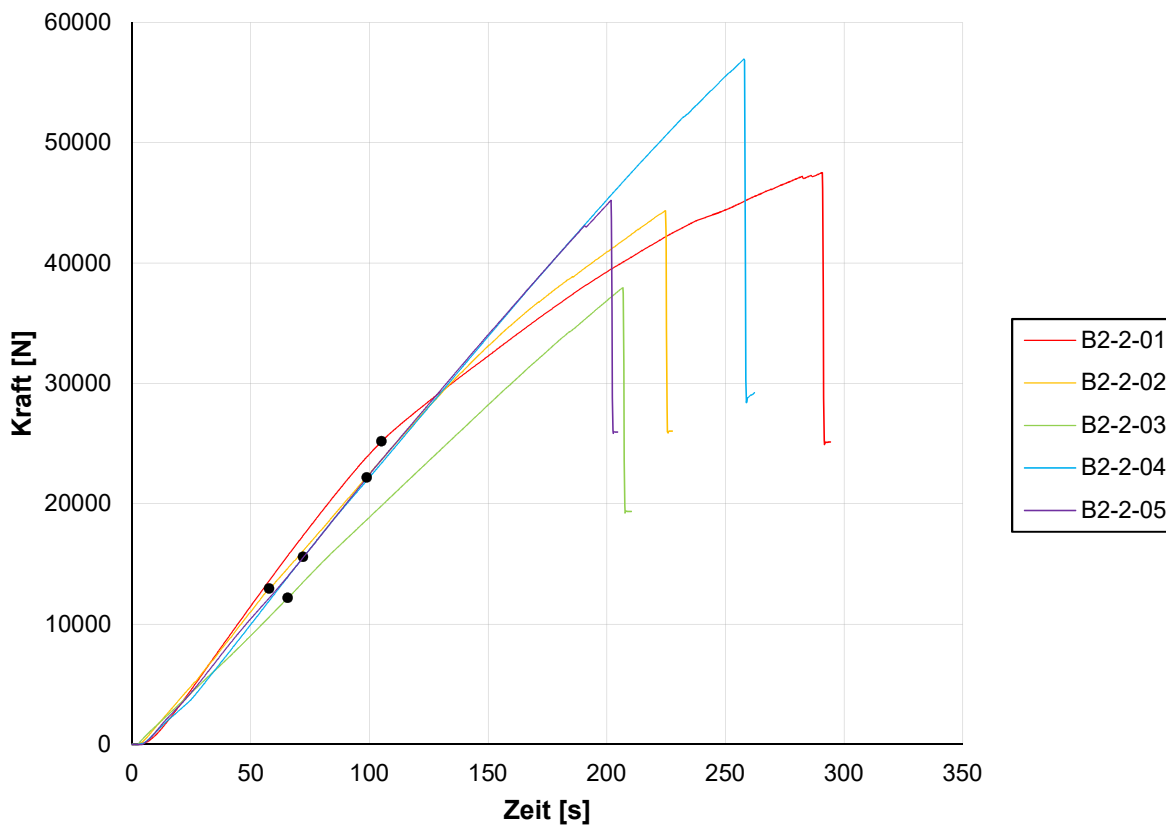


Abbildung 5-10: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B2-2

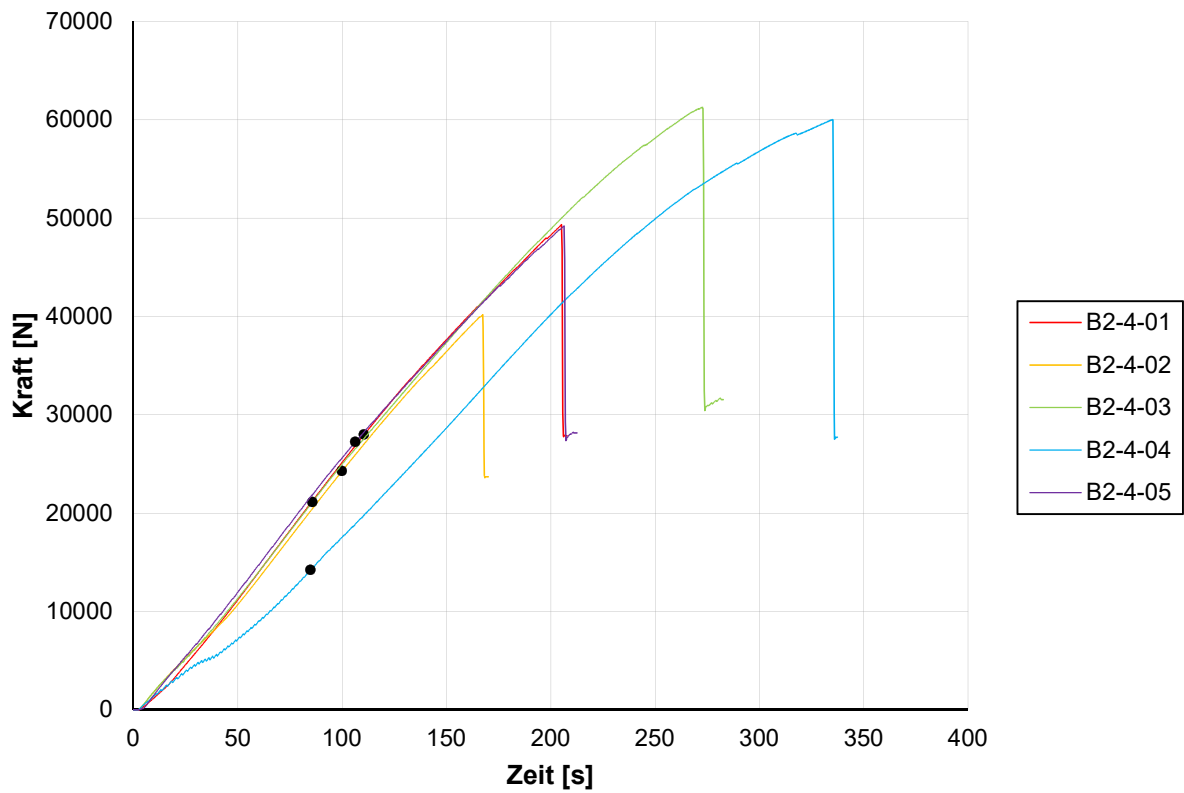


Abbildung 5-11: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B2-4

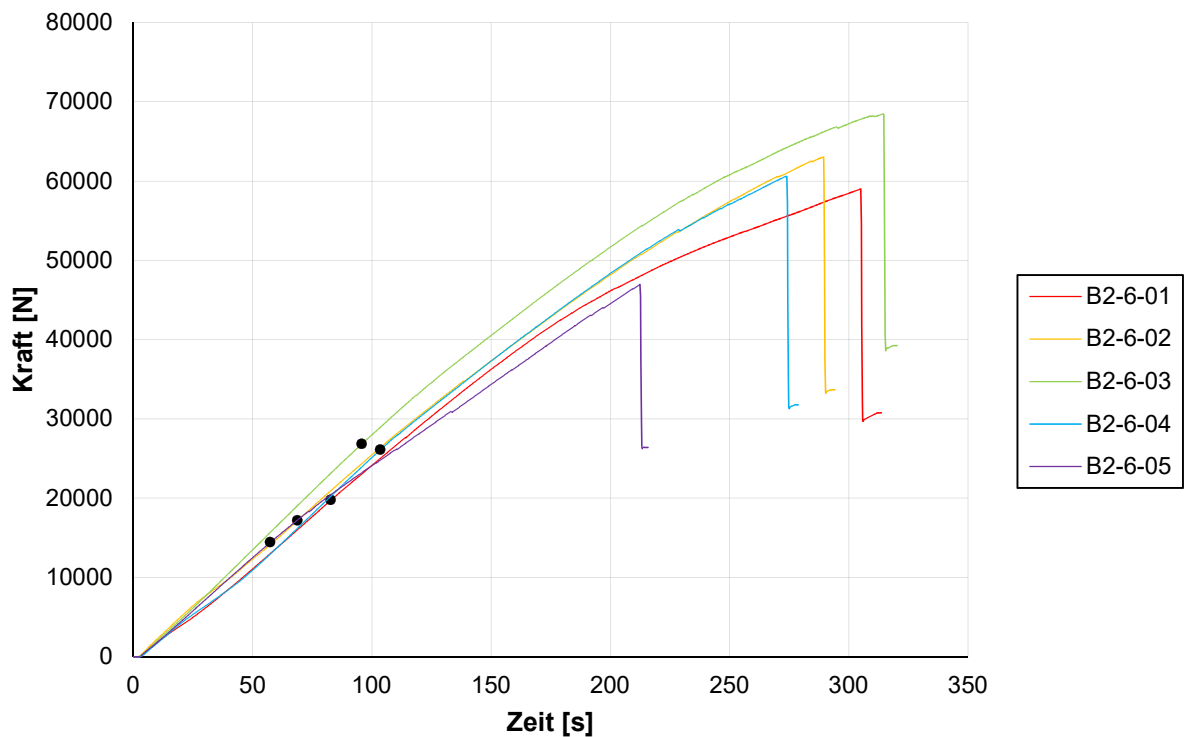


Abbildung 5-12: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B2-6

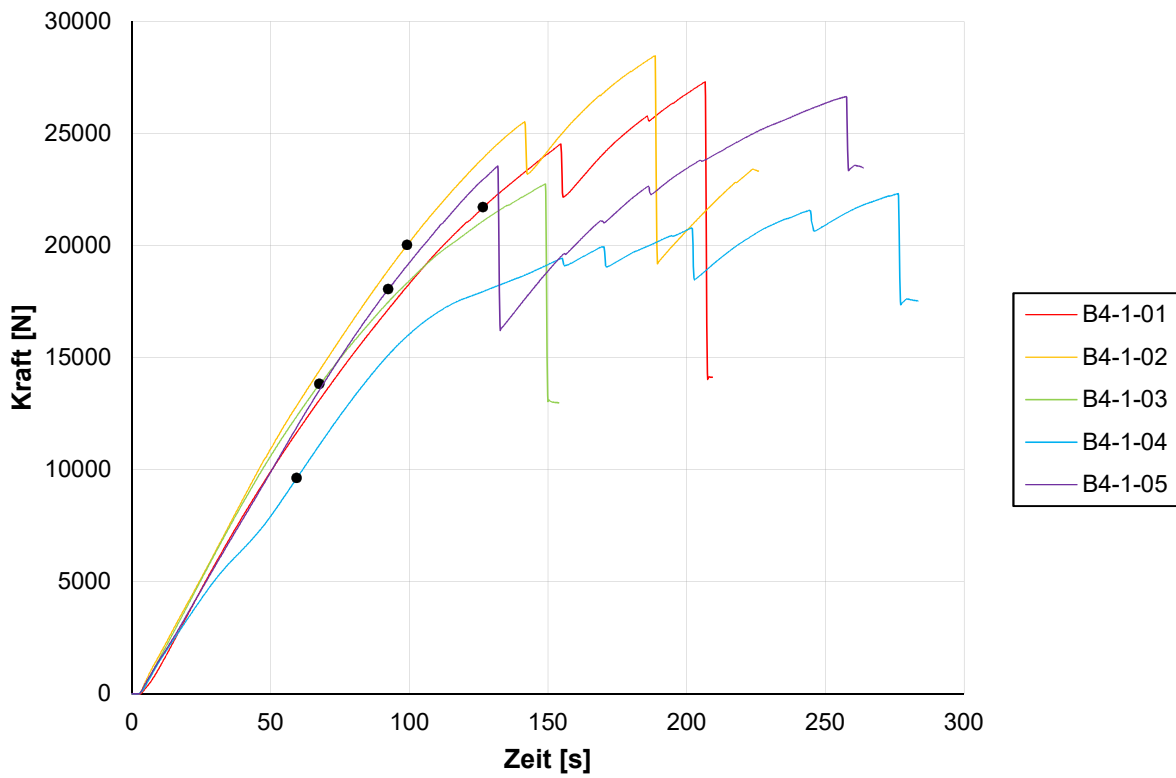


Abbildung 5-13: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B4-1

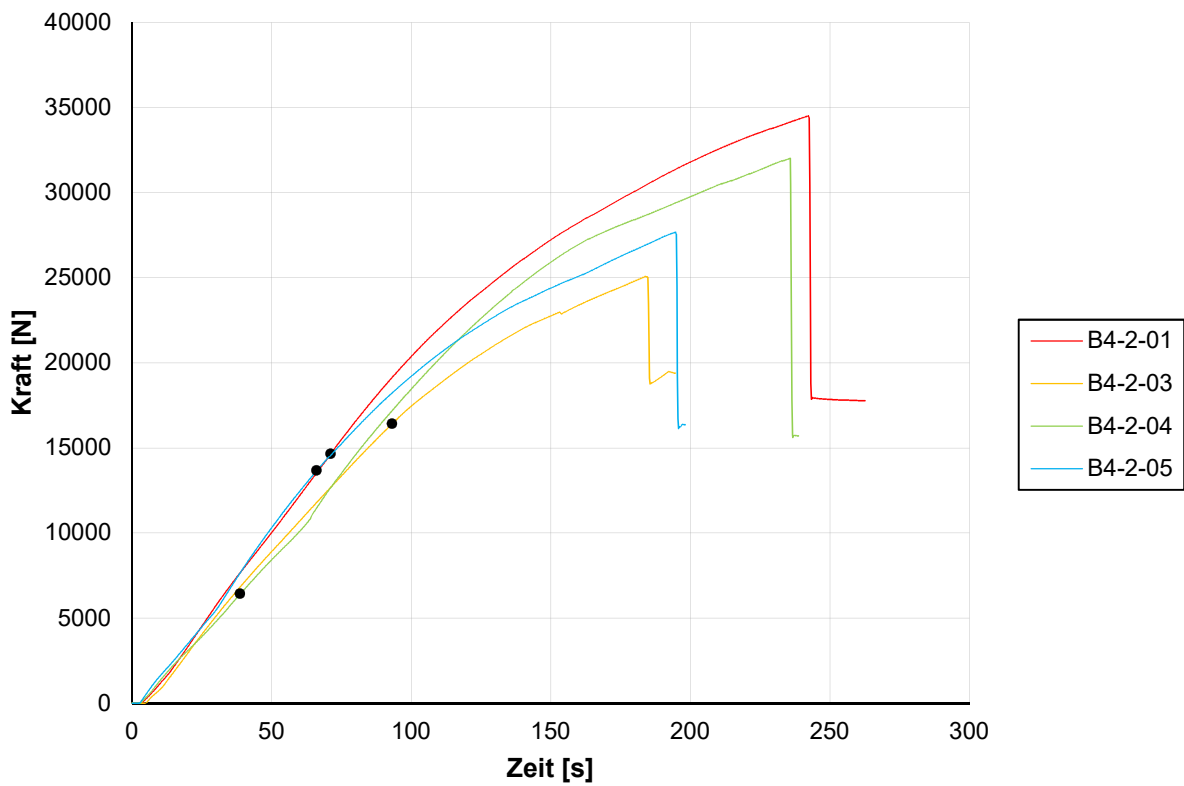


Abbildung 5-14: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B4-2

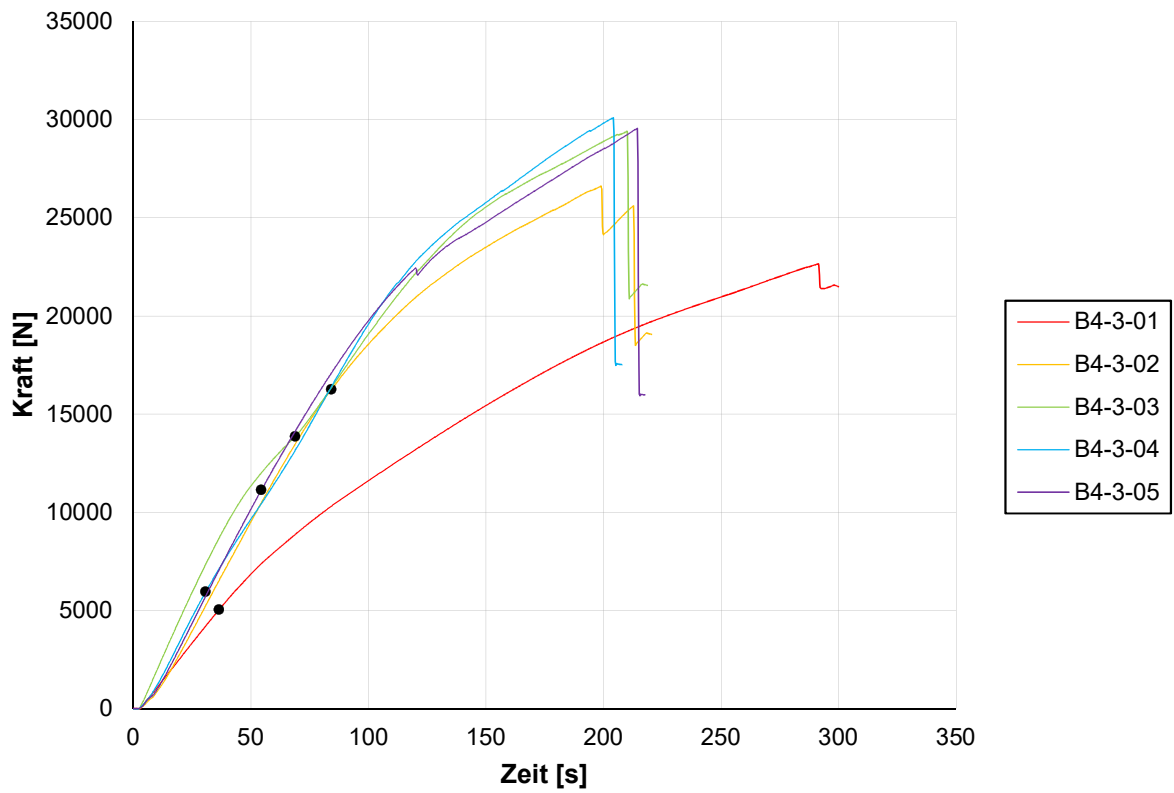


Abbildung 5-15: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B4-3

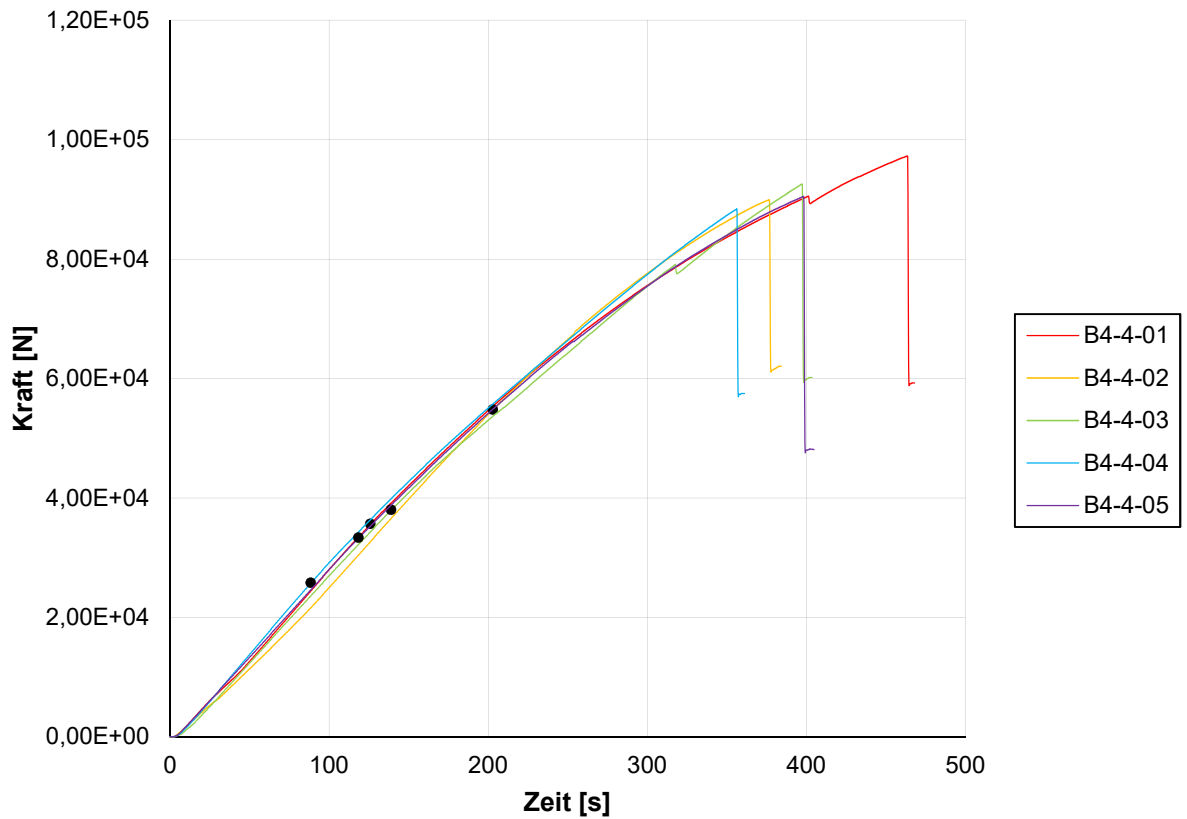


Abbildung 5-16: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B4-4

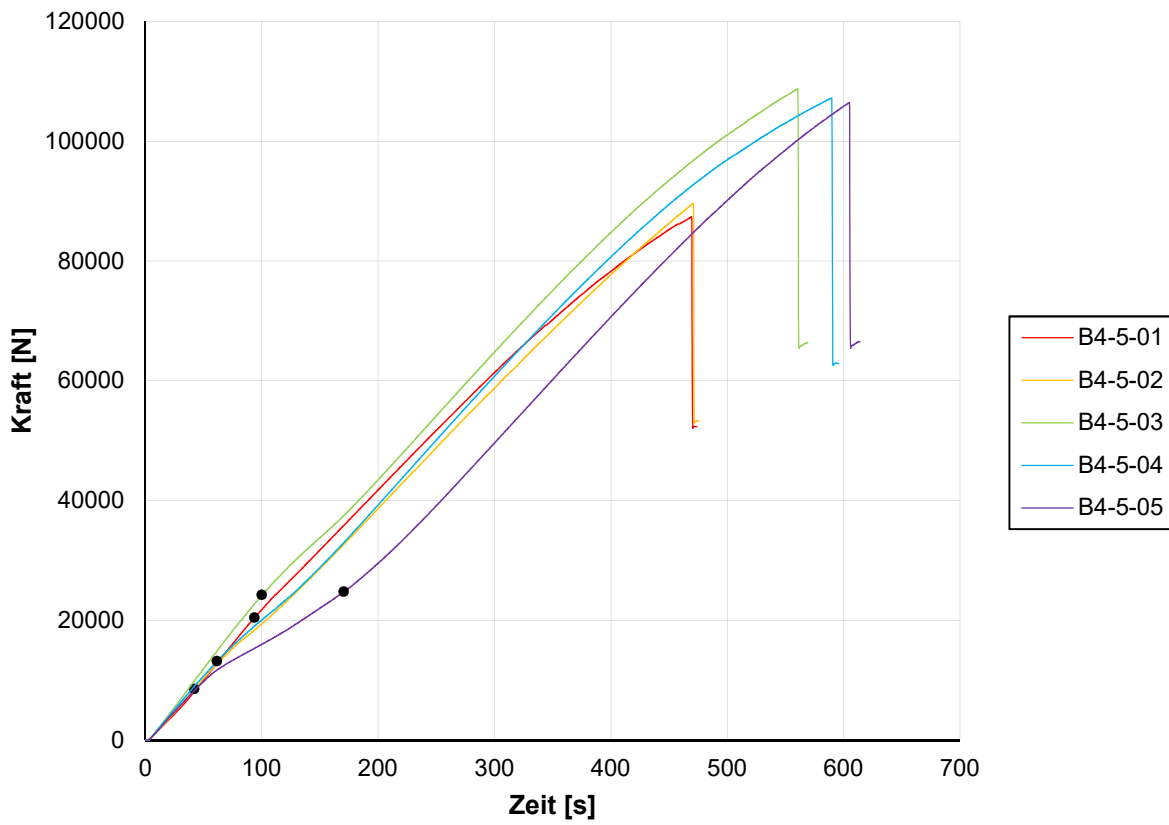


Abbildung 5-17: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B4-5

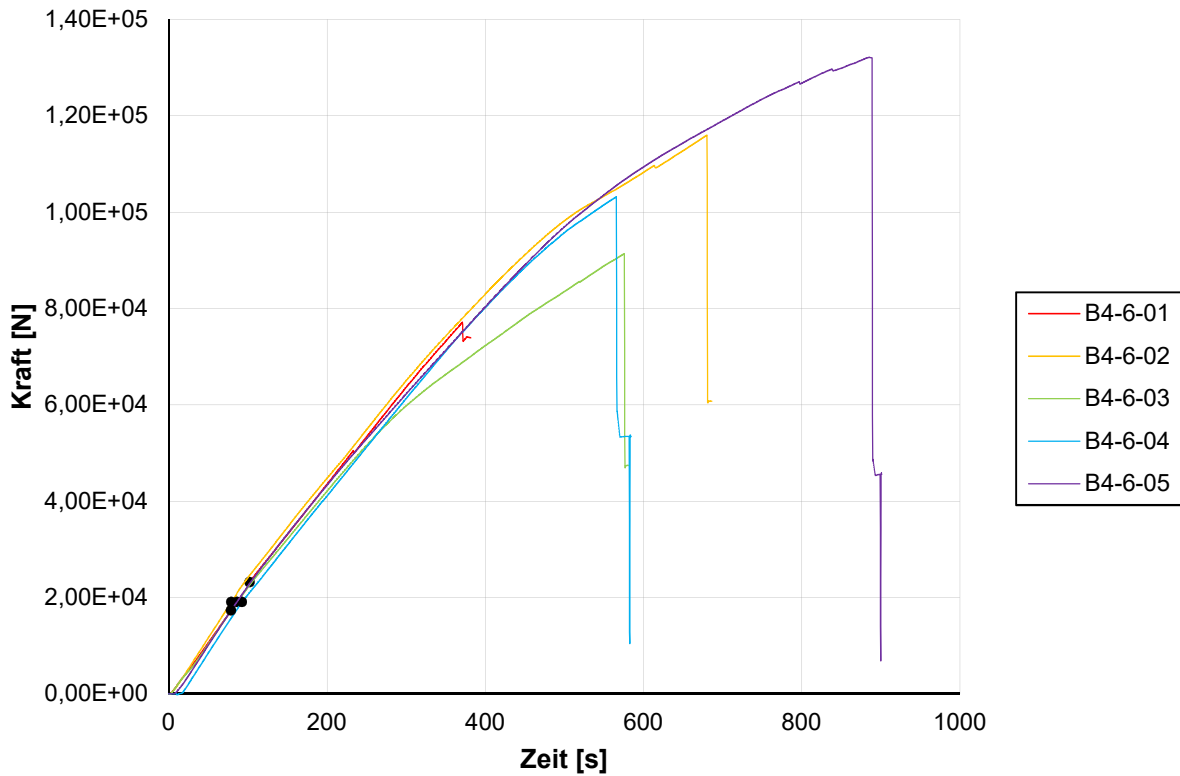


Abbildung 5-18: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B4-6

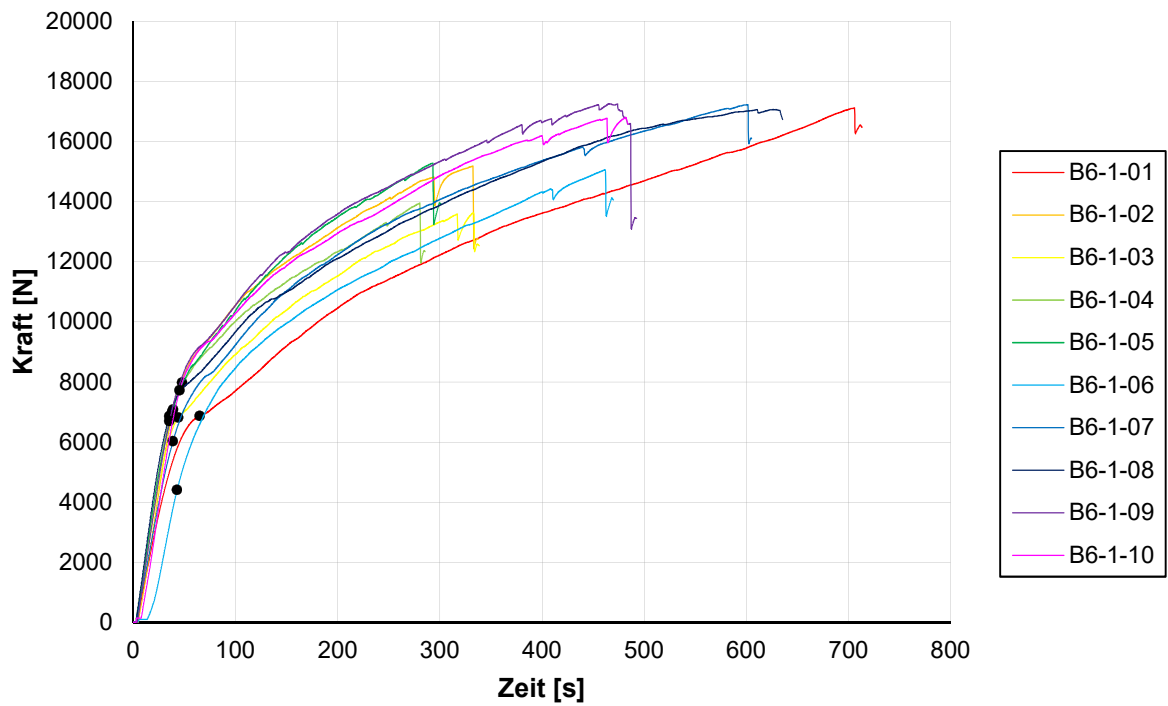


Abbildung 5-19: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B6-1

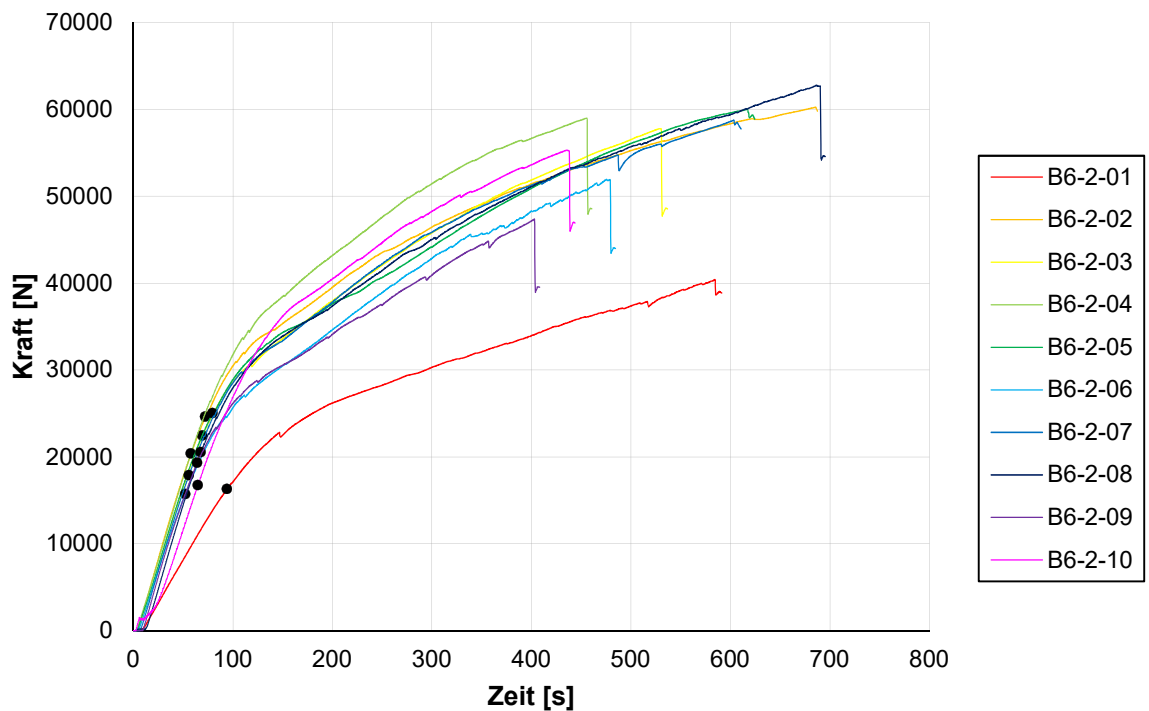


Abbildung 5-20: Kraft-Zeit-Diagramm für die Versuche der Serie B6-2

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskennzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl